



Dottorato di ricerca  
“Scienze dell’Ingegneria civile” – Ingegneria Geotecnica  
Ciclo XXII

# **MODELLAZIONE FISICA DI PALI TRIVELLATI IN SABBIA**

*Settore Scientifico Disciplinare ICAR/07*

Dottoranda

*Dott. Ing. Lara Guerra*

Tutori

*Prof. Ing. Vincenzo Fioravante*

*Prof. Ing. Michele Jamiolkowski*

---

## ***ABSTRACT***

---

The dissertation deals with the modelling of the behaviour of bored pile, embedded in a coarse grained soil, axially loaded in tension and compression, with particular attention to the mobilization of the lateral and the base capacities.

A series of almost 60 centrifuge tests has been carried out on free-headed and close-ended rough model piles, instrumented and not, whose dimensions varies from 8 mm to 32 mm in diameter and 160 mm to 320 mm in length. The tests have been carried out at various acceleration levels between 30g and 160g, thus simulating a large series of prototype dimensions. The “ideally non-displacement” model piles are embedded in a very fine silica sand, called FF, pluvially deposited at a medium and a high density.

To analyse the load direction effect on the mobilisation of the skin friction, the results of tension tests are compared with those gathered in compression at same state conditions.

A series of almost 150 direct shear constant normal stiffness tests, on interface between FF sand and rigid aluminium plates of various surface roughness has been performed.

All centrifuge and direct shear constant normal stiffness tests have been performed at the ISMGEO laboratories (Istituto Sperimentale Modelli Geotecnici in Seriate BG, Italy), which totally financed the experimental program.

The conceptual framework of the physical modelling of bored pile foundation in centrifuge is described in the first part of the thesis, underlining the limitations mainly connected to the scale effects. The experimental set up, the model piles dimensions and characteristics, the

mechanical properties of the FF sand, the sample deposition technique, the test instrumentations and procedures are also outlined.

The common empirical correlations for the prediction of the shaft resistance are summarised and applied to the centrifuge test results; a new formulation to evaluate the normal stress variation, acting on the pile shaft at peak friction, is also proposed, which take into account for the density of the sand.

The scale effects on the ultimate shaft resistance and on the correlated settlement are analysed so as the displacement scaling law which has to be applied on the interface behaviour to scale the settlement of model pile to prototype scale.

The critical and ultimate base resistance of model non-displacement piles loaded in centrifuge tests are evaluated using the most common practical correlations. New formulations for the evaluation of the critical base resistance from a cone penetration test and the sand state parameters are presented.

The main conclusions derived from the centrifuge loading tests on model piles, from the direct shear constant normal stiffness interface tests and from some literature data, are summarised in the last chapter together with future developments of the research.

---

## ***SOMMARIO***

---

La tesi di dottorato ha per oggetto il comportamento del palo trivellato in terreno granulare sottoposto a trazione e compressione assiale, con particolare riferimento ai meccanismi di interazione palo-terreno responsabili della mobilitazione della portata laterale e della portata di base.

La ricerca è sviluppata attraverso una campagna sperimentale di modellazione fisica in scala ridotta, composta da circa 60 prove di carico in centrifuga eseguite su pali modello di varie dimensioni a punta chiusa liberi in sommità, strumentati e non, aventi superficie rugosa. I pali modello sono idealmente trivellati in campioni di sabbia secca FF ricostruiti a due gradi di addensamento, uno medio e uno alto, e testati in trazione e in compressione allo scopo di analizzare l'influenza che la direzione del carico assiale ha sulla mobilitazione delle tensioni tangenziali. I modelli sono stati portati ad accelerazioni comprese tra 30g e 160g, simulando una vasta gamma di dimensioni di palo prototipo.

Il meccanismo di interazione che si genera tra inclusione rigida rugosa e sabbia FF è studiato anche mediante l'elaborazione di circa 150 prove di taglio diretto a rigidità normale imposta di interfaccia, eseguite con piastre di alluminio di differenti rugosità superficiali.

La totalità delle prove in centrifuga e di taglio diretto a rigidità normale imposta, è stata eseguita presso i laboratori dell'ISMGEO (Istituto Sperimentale Modelli Geotecnici, Seriate BG) che ha interamente finanziato la sperimentazione.

Nella prima parte della tesi sono illustrati i concetti alla base della modellazione fisica in scala ridotta e ne sono evidenziate le limitazioni, in particolare quelle concernenti gli effetti scala. La campagna di prove di carico in centrifuga è successivamente descritta, con indicazioni sulle



caratteristiche geometriche dei pali modello impiegati, sulle proprietà meccaniche della sabbia FF di prova, sulla ricostruzione dei campioni, sulla strumentazione adottata e sulle procedure di prova seguite.

Utilizzando i risultati delle prove in scala ridotta, sono presentate le prime interessanti considerazioni relative all'effetto della direzione del carico assiale sulla mobilitazione delle tensioni tangenziali.

Le più diffuse correlazioni presenti in letteratura per la determinazione della tensione tangenziale di picco sono riassunte ed applicate ai risultati delle prove in centrifuga; è proposta una nuova formulazione analitica per la stima della variazione della tensione normale al fusto del palo trivellato in sabbia, che tenta di cogliere l'effetto del grado di addensamento sul comportamento dell'interfaccia palo-sabbia.

Largo spazio è dato nell'intera tesi allo studio degli effetti scala sulla tensione tangenziale di picco e sullo spostamento a cui essa si mobilita, argomento di grande interesse nel settore della modellazione fisica in centrifuga. La legge di scala sullo spostamento all'interfaccia, relazione fondamentale ma ancora non definita in modo soddisfacente, è ricercata integrando i dati ottenuti dalla campagna di prove in scala ridotta con quelli reperiti in letteratura.

Le portate di base critica e ultima dei pali modello trivellati in sabbia FF, sottoposti a prove in centrifuga, sono interpretate impiegando gli approcci progettuali comunemente adottati. Inoltre, per la loro stima, sono ipotizzate nuove correlazioni basate sul valore di  $q_c$ , resistenza alla punta di prove penetrometriche statiche, oltre che sul grado di addensamento e sullo stato tensionale efficace della sabbia alla base del palo.

Le principali conclusioni ricavate dall'interpretazione delle prove di carico in scala ridotta e dall'integrazione dei loro risultati con quelli delle prove di taglio diretto a rigidità normale imposta e con i dati reperiti in letteratura su pali trivellati in vera grandezza, sono riportate nella parte finale della tesi dove sono inoltre segnalati alcuni spunti per proseguire la presente ricerca.

---

## ***INDICE***

---

|                            |      |
|----------------------------|------|
| SOMMARIO .....             | i    |
| ABSTRACT.....              | iii  |
| INDICE DELLE FIGURE.....   | ix   |
| INDICE DELLE TABELLE ..... | xvii |
| INDICE DEI SIMBOLI .....   | xxi  |

---

## ***INTRODUZIONE***

---

|                                      |   |
|--------------------------------------|---|
| I.1 INQUADRAMENTO DELLA RICERCA..... | 1 |
| I.2 STRUTTURA DELLA TESI.....        | 2 |

## ***CAPITOLO 1***

---

### ***MODELLAZIONE FISICA IN CENTRIFUGA GEOTECNICA***

---

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1.1   | INTRODUZIONE .....  | 5  |
| 1.2   | LA MODELLAZIONE FISICA IN UN CAMPO GRAVITAZIONALE<br>ARTIFICIALE..... | 7  |
| 1.2.1 | LEGGI DI SCALA .....  | 7  |
| 1.2.2 | DISTORSIONE DEL CAMPO GRAVITAZIONALE.....                             | 11 |
| 1.3   | LA CENTRIFUGA GEOTECNICA DEL I.S.M.GEO. ....                          | 14 |
| 1.4   | IL MATERIALE DI PROVA: SABBIA FF.....                                 | 17 |

|     |                                       |    |
|-----|---------------------------------------|----|
| 1.5 | PALI MODELLO .....                    | 22 |
| 1.6 | PREPARAZIONE DEL MODELLO.....         | 28 |
| 1.7 | ESECUZIONE DELLA PROVA DI CARICO..... | 34 |

## **CAPITOLO 2**

---

### **INTERPRETAZIONE DELLE PROVE DI CARICO IN CENTRIFUGA**

---

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 2.1 | INTRODUZIONE .....                                      | 37 |
| 2.2 | CONDIZIONE DI EQUILIBRIO DEL PALO CARICATO .....        | 37 |
| 2.3 | TENSIONI RESIDUE LATERALI E DI BASE .....               | 44 |
| 2.4 | INFLUENZA DELLA DIREZIONE DEL CARICO ASSIALE .....      | 49 |
| 2.5 | MODELLO DEL MODELLO .....                               | 59 |
| 2.6 | EFFETTI SCALA SULLO SPOSTAMENTO AL PICCO $w_{su}$ ..... | 64 |
| 2.7 | CURVE DI MOBILITAZIONE DELL'ATTRITO LATERALE.....       | 78 |

## **CAPITOLO 3**

---

### **PROVE DI INTERFACCIA: TAGLIO DIRETTO A RIGIDEZZA NORMALE IMPOSTA**

---

|     |  |     |
|-----|--|-----|
| 3.1 | INTRODUZIONE .....   | 83  |
| 3.2 | PROVA DI TAGLIO DIRETTO A RIGIDEZZA NORMALE IMPOSTA .....  | 87  |
|     | 3.2.1 APPARECCHIATURA DI PROVA .....                       | 87  |
|     | 3.2.2 PREPARAZIONE DEL CAMPIONE .....                      | 94  |
| 3.3 | CAMPAGNA SPERIMENTALE.....                                 | 95  |
|     | 3.3.1 CENNI SU ALCUNE PROBLEMATICHE SPERIMENTALI .....     | 99  |
| 3.4 | RISULTATI SPERIMENTALI.....                                | 103 |
|     | 3.4.1 EFFETTO DELLA RIGIDEZZA $K$ .....                    | 103 |
|     | 3.4.2 EFFETTO DELLA TENSIONE INIZIALE $\sigma'_{n0}$ ..... | 108 |

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 3.5   | EFFETTI DELLA RUGOSITÀ NORMALIZZATA SU $\tau_{su}$ , $\tau_{cv}$ E $w_{su}$ ..... | 112 |
| 3.5.1 | EFFETTO DI $R_n$ SULLA TENSIONE TANGENZIALE $\tau_{su}$ .....                     | 112 |
| 3.5.2 | EFFETTO DI $R_n$ SULLA TENSIONE TANGENZIALE $\tau_{cv}$ .....                     | 117 |
| 3.5.3 | EFFETTO DI $R_n$ SULLO SPOSTAMENTO $w_{su}$ .....                                 | 119 |
| 3.6   | CONSIDERAZIONI SULLO SPOSTAMENTO $w_{su}$ .....                                   | 121 |
| 3.7   | CONSIDERAZIONI SULLA VARIAZIONE TENSIONALE $\Delta\sigma'_n$ .....                | 124 |

## ***CAPITOLO 4***

---

### ***VALUTAZIONE DELL'ATTRITO LATERALE***

---

|       |   |     |
|-------|---|-----|
| 4.1   | INTRODUZIONE .....  | 129 |
| 4.1.1 | METODO $\beta$ .....  | 130 |
| 4.1.2 | METODO DIRETTI.....   | 132 |
| 4.1.3 | METODO INDIRETTI .....  | 133 |
| 4.2   | DETERMINAZIONE DI $\Delta\sigma'_n$ DALLA TEORIA DELLA CAVITÀ ESPANSA ... | 135 |
| 4.3   | DETERMINAZIONE DI $\Delta\sigma'_n$ DA PROVE IN CENTRIFUGA.....           | 146 |
| 4.3.1 | EFFETTI SCALA SULLA TENSIONE TANGENZIALE $\tau_{su}$ .....                | 155 |
| 4.4   | DETERMINAZIONE DI $\tau_{su}$ DA METODO $\beta$ .....                     | 158 |

## ***CAPITOLO 5***

---

### ***VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ PORTANTE DI BASE***

---

|     |   |     |
|-----|---|-----|
| 5.1 | INTRODUZIONE .....  | 165 |
| 5.2 | PROVA PENETROMETRICA STATICA IN CENTRIFUGA .....            | 170 |
| 5.3 | PORTATA DI BASE CRITICA .....                               | 175 |
| 5.4 | PORTATA DI BASE ULTIMA.....                                 | 181 |
| 5.5 | CURVE DI MOBILITAZIONE DELLA PORTATA DI BASE UNITARIA ..... | 186 |

|     |                                       |     |
|-----|---------------------------------------|-----|
| 5.6 | SCOMPOSIZIONE DEL CARICO TOTALE ..... | 188 |
|-----|---------------------------------------|-----|

---

## ***CAPITOLO 6***

---

### ***CONCLUSIONI***

---

|       |  |     |
|-------|--|-----|
| 6.1   | CONCLUSIONI .....                                      | 191 |
| 6.1.1 | CONCLUSIONI RELATIVE AGLI OBIETTIVI PROGETTUALI .....  | 191 |
| 6.1.2 | CONCLUSIONI RELATIVE AGLI OBIETTIVI SPERIMENTALI ..... | 192 |
| 6.2   | FUTURI SVILUPPI .....                                  | 193 |

---

|                            |     |
|----------------------------|-----|
| <b><i>BIBLIOGRAFIA</i></b> | 195 |
|----------------------------|-----|

---

## ***ALLEGATO A***

---

### ***RISULTATI DELLE PROVE DS-CNS***

---

## ***ALLEGATO B***

---

### ***RISULTATI DELLE PROVE DI CARICO IN CENTRIFUGA***

---

---

## INDICE DELLE FIGURE

---

### CAPITOLO 1

|                     |   |    |
|---------------------|---|----|
| <u>Figura 1.1</u>   | Curvatura del campo di accelerazione centrifugo (a); Elemento di terreno A interno al modello (b).....  | 12 |
| <u>Figura 1.2</u>   | Confronto tra tensioni verticali indotte dal campo gravitazionale e quelle in centrifuga .....  | 13 |
| <u>Figura 1.3</u>   | Particolare del braccio rotante e di parte della pesante copertura metallica al piano di calpestio.....   | 14 |
| <u>Figura 1.4</u>   | Meccanismo di movimentazione del cestello basculante.....   | 15 |
| <u>Figura 1.5</u>   | Sezione trasversale della centrifuga geotecnica IGC del I.S.M.GEO. [Fioravante, 1994].....  | 16 |
| <u>Figura 1.6</u>   | Curva granulometrica della sabbia FF.....   | 17 |
| <u>Figura 1.7a</u>  | Percorsi tensionali $q$ - $p'$ di tre prove TXCID con rottura CC eseguite su provini saturi di sabbia FF.....   | 19 |
| <u>Figura 1.7b</u>  | Percorsi tensodeformativi $q$ / $p'$ / $\varepsilon_a$ di tre prove TXCID con rottura CC eseguite su provini saturi di sabbia FF.....                   | 19 |
| <u>Figura 1.8</u>   | Confronto tra $G_{0 mis}$ e $G_{0 calc}$ dalle correlazioni (1.12) e (1.13).....  | 21 |
| <u>Figura 1.9</u>   | Curve di decadimento del modulo di Young da prove TX-CID.....   | 22 |
| <u>Figura 1.10a</u> | Geometria dei pali modello.....   | 24 |
| <u>Figura 1.10b</u> | Pali modello $d_m=10$ mm con 2 e 4 celle di carico interne. ....  | 25 |
| <u>Figura 1.11a</u> | Particolari delle celle di carico di base del palo $d_m=8$ mm (a) e del palo $d_m=16$ mm (b).....   | 25 |
| <u>Figura 1.11b</u> | Disegno tecnico della cella di base del palo $d_m=16$ mm (quote in mm).....   | 26 |
| <u>Figura 1.12</u>  | Ciclo di calibrazione delle celle C1 (intermedia) e B1 (base) del palo $d_m=8$ mm con le rispettive costanti di calibrazione $K_{C1}$ e $K_{B1}$ . .... | 27 |
| <u>Figura 1.13</u>  | Deposizione pluviale della sabbia FF secca a 1g .....   | 29 |

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| <u>Figura 1.14</u> | <i>Fasi realizzative dell'installazione dei pali modello idealmente trivellati</i> .....                 | 30 |
| <u>Figura 1.15</u> | <i>Modello strumentato alloggiato nel cestello della centrifuga</i> .....                                | 31 |
| <u>Figura 1.16</u> | <i>Schemi delle configurazioni di prova in trazione (a) e in compressione (b)</i> .....                  | 32 |
| <u>Figura 1.17</u> | <i>Particolari della testa del palo e del sistema di carico (a) in trazione e (b) compressione</i> ..... | 33 |

## CAPITOLO 2

|                    |  |    |
|--------------------|--|----|
| <u>Figura 2.1</u>  | <i>Condizione di equilibrio per un palo caricato assialmente in compressione (a) e in trazione (b)</i> .....   | 38 |
| <u>Figura 2.2</u>  | <i>Condizione di equilibrio locale per un palo caricato assialmente in compressione (a) e in trazione (b)</i> .....  | 40 |
| <u>Figura 2.3a</u> | <i>Curve di capacità portante per la prova di carico a MD in compressione PT3a_FF8 (scala modello)</i> .....   | 41 |
| <u>Figura 2.3b</u> | <i>Curve di capacità portante media e locali per la prova di carico a MD in compressione PT3a_FF8 (scala modello)</i> .....  | 42 |
| <u>Figura 2.4</u>  | <i>Definizione della rugosità totale <math>R_t</math> e della rugosità normalizzata <math>R_n</math></i> .....   | 42 |
| <u>Figura 2.5</u>  | <i>Ipotesi di spessore della banda di taglio e dimensione maggiorata del diametro del palo modello [Garnier e König, 1998]</i> .....   | 44 |
| <u>Figura 2.6</u>  | <i>Cedimento relativo palo-sabbia alla fine della consolidazione</i> ....  | 45 |
| <u>Figura 2.7</u>  | <i>Tensioni laterali residue su pali modello idealmente trivellati in sabbia [Colombi 2005].</i> .....   | 46 |
| <u>Figura 2.8</u>  | <i>Individuazione del punto di origine della curva di mobilitazione dell'attrito laterale</i> .....  | 46 |
| <u>Figura 2.9a</u> | <i>Curve delle tensioni tangenziali medie agenti localmente sui singoli conci ottenute non tenendo in conto le tensioni residue.</i> ..  | 47 |
| <u>Figura 2.9b</u> | <i>Curve delle tensioni tangenziali medie agenti localmente sui singoli conci ottenute tenendo conto delle tensioni residue</i> .....  | 47 |
| <u>Figura 2.10</u> | <i>Ricostruzione del tratto iniziale della curva <math>Q_b-w</math> per tenere conto della portata di base residua <math>Q_{b0}</math></i> .....                                     | 48 |
| <u>Figura 2.11</u> | <i>Esempio di ricostruzione del tratto iniziale e traslazione della curva <math>Q_b-w</math> per tenere conto della portata di base residua <math>Q_{b0}</math> (PT3a_FF8)</i> ..... | 49 |
| <u>Figura 2.12</u> | <i>Curve delle portata laterale per una prova in compressione (SPC_8_MD_120) ed una in trazione (SPT_8_MD_120)</i> .....   | 52 |

|                     |   |    |
|---------------------|---|----|
| <u>Figura 2.13</u>  | Curve delle tensioni tangenziali agenti localmente sul concio A e B nelle prove di trazione (SPT_8_MD_120) e di compressione (SPC_8_MD_120).....  | 53 |
| <u>Figura 2.14</u>  | Curva normalizzata delle tensioni tangenziali agenti sul manicotto di base nella prova di trazione SPT_8_MD_120.....  | 54 |
| <u>Figura 2.15</u>  | Schema della formazione e della propagazione del bulbo di detensionamento attorno alla base del palo modello.....   | 54 |
| <u>Figura 2.16</u>  | Curve delle tensioni tangenziali medie mobilitate nelle prove di trazione (SPT_8_MD_120) e di compressione (SPC_8_MD_120).<br>.....   | 55 |
| <u>Figura 2.17</u>  | Curve delle tensioni tangenziali medie mobilitate nelle prove di trazione (SPT_8_HD_120) e di compressione (SPC_8_HD_120).<br>.....   | 57 |
| <u>Figura 2.18</u>  | Curve delle tensioni tangenziali agenti localmente sul concio A e B nelle prove di trazione (SPT_8_HD_120) e di compressione (SPC_8_HD_120).<br>.....   | 57 |
| <u>Figura 2.19</u>  | Rappresentazione della modellazione dei modelli.....  | 61 |
| <u>Figura 2.20</u>  | Principi della modellazione dei modelli.....  | 61 |
| <u>Figura 2.21</u>  | Costruzione dei 2 modelli del modello.....  | 62 |
| <u>Figura 2.22</u>  | Modello del modello per il Prototipo 1 e Prototipo 2.....   | 64 |
| <u>Figura 2.23a</u> | Effetto scala $d_m/D_{50}$ su $w_{su}$ – prove di compressione.....   | 67 |
| <u>Figura 2.23b</u> | Effetto scala $d_m/D_{50}$ su $w_{su}$ – prove di trazione .....  | 67 |
| <u>Figura 2.24a</u> | Effetto scala $a/g$ su $w_{su}$ – prove di compressione.....  | 68 |
| <u>Figura 2.24b</u> | Effetto scala $a/g$ su $w_{su}$ – prove di trazione.....  | 68 |
| <u>Figura 2.25</u>  | Effetto scala $d_m/D_{50}$ e $a/g$ su $w_{su}$ – prove di torsione.....   | 70 |
| <u>Figura 2.26</u>  | Spostamenti all'interfaccia $w_{su}$ da prove di carico su pali trivellati in vera grandezza e in centrifuga, sottoposti a sforzi assiali di compressione e di trazione – terreni a media densità MD.....                       | 74 |
| <u>Figura 2.27</u>  | Spostamenti all'interfaccia $w_{su}$ da prove di carico su pali trivellati in vera grandezza e in centrifuga, sottoposti a sforzi assiali di compressione e di trazione – terreni ad alta densità HD.....                       | 75 |
| <u>Figura 2.28</u>  | Spostamenti all'interfaccia $w_{su}$ da prove di carico su pali trivellati in vera grandezza e in centrifuga (fattore di scala=10), sottoposti a sforzi assiali di compressione e di trazione – terreni ad alta densità HD..... | 77 |
| <u>Figura 2.29</u>  | Spostamenti all'interfaccia $w_{su}$ da prove di carico su pali trivellati in vera grandezza e in centrifuga (fattore di scala=10), sottoposti a sforzi assiali di compressione e di trazione – terreni ad alta densità HD..... | 77 |



|                      |   |    |
|----------------------|---|----|
| <u>Figura 2.30a</u>  | Curve di mobilitazione delle tensioni tangenziali di pali modello trivellati in sabbia FF secca deposta a media densità (MD) e caricati assialmente in trazione; curva interpolatrice a MD.....           | 78 |
| <u>Figura 2.30b</u>  | Curve di mobilitazione delle tensioni tangenziali di pali modello trivellati in sabbia FF secca deposta a media densità (MD) e caricati assialmente in compressione; curva interpolatrice a MD.<br>.....  | 79 |
| <u>-Figura 2.31a</u> | Curve di mobilitazione delle tensioni tangenziali di pali modello trivellati in sabbia FF secca deposta ad alta densità (HD) e caricati assialmente in trazione; curva interpolatrice a HD. ....          | 79 |
| <u>Figura 2.31b</u>  | Curve di mobilitazione delle tensioni tangenziali di pali modello trivellati in sabbia FF secca deposta ad alta densità (HD) e caricati assialmente in compressione; curva interpolatrice a HD..<br>..... | 80 |

### CAPITOLO 3

|                    |   |     |
|--------------------|---|-----|
| <u>Figura 3.1</u>  | Modello di Wernick [1978]: condizione iniziale (a) e condizione deformata (b) dell'interfaccia.....                           | 84  |
| <u>Figura 3.2</u>  | Schema dell'apparecchiatura DS-CNS per prove di interfaccia.  | 86  |
| <u>Figura 3.3</u>  | Apparecchiatura di taglio diretto a rigidità normale imposta...   | 88  |
| <u>Figura 3.4</u>  | Scatola di taglio contenente il campione ricostruito di sabbia FF.<br>.....   | 89  |
| <u>Figura 3.5</u>  | Particolare del posizionamento dei 3 trasduttori di spostamento verticali.....  | 90  |
| <u>Figura 3.6</u>  | Ciclo di taratura e dettagli geometrici della molla con rigidità nominale $k=100$ kPa/mm.....                                 | 91  |
| <u>Figura 3.7a</u> | Ciclo di taratura dell'attuatore con rigidità nominale $k=1000$ kPa/mm. ....  | 92  |
| <u>Figura 3.7b</u> | Taratura dell'attuatore con rigidità nominale $k=1000$ kPa/mm..<br>.....  | 92  |
| <u>Figura 3.8</u>  | Particolare dell'alloggiamento della molla e dell'intelaiatura rigida utilizzata per l'applicazione del carico assiale N..... | 93  |
| <u>Figura 3.9</u>  | Schemi di deposizione: (a) Yoshimi e Kishida [1981]; (b) Uesugi e Kishida [1986a] (da [Uesugi e Kishida 1986a]).              | 94  |
| <u>Figura 3.10</u> | Curva $\tau_s - w$ della prove DS-CNS di interfaccia MD-0.80-1000-150 .....   | 100 |
| <u>Figura 3.11</u> | Fuoriuscita di sabbia FF sul perimetro dell'alloggiamento del provino: immagine a fine prova.....                             | 101 |

|                    |   |     |
|--------------------|---|-----|
| <u>Figura 3.12</u> | <i>Fuoriuscita di sabbia FF sul perimetro dell'alloggiamento del provino dopo l'applicazione di un film di grasso al silicone: immagine a fine prova.</i> .....   | 101 |
| <u>Figura 3.13</u> | <i>Rotazione della testa di carico indotta dalla fuoriuscita della sabbia.</i> .....  | 102 |
| <u>Figura 3.14</u> | <i>Prove DS-CNS sabbia su sabbia con <math>\sigma'_{n0}=150</math> kPa: (a) curve <math>\tau_s - w</math>, (b) curve <math>\tau_s - \sigma'_n</math>, (c) curve <math>u - w</math>.</i> .....                             | 106 |
| <u>Figura 3.15</u> | <i>Prove DS-CNS sabbia FF su piastra di <math>R_n=0.6</math> con <math>\sigma'_{n0}=150</math> kPa: (a) curve <math>\tau_s - w</math>, (b) curve <math>\tau_s - \sigma'_n</math>, (c) curve <math>u - w</math>.</i> ..... | 107 |
| <u>Figura 3.16</u> | <i>Prove DS-CNS sabbia su sabbia con <math>k=1000</math> kPa/mm: (a) curve <math>\tau_s - w</math>, (b) curve <math>\tau_s - \sigma'_n</math>, (c) curve <math>u - w</math>.</i> .....                                    | 110 |
| <u>Figura 3.17</u> | <i>Prove DS-CNS sabbia FF su piastra di <math>R_n=0.6</math> con <math>k=1000</math> kPa/mm: (a) curve <math>\tau_s - w</math>, (b) curve <math>\tau_s - \sigma'_n</math>, (c) curve <math>u - w</math>.</i> .....        | 111 |
| <u>Figura 3.18</u> | <i>Prove DS-CNL al variare di <math>D_R</math>: (a) Fujigawa sand; (b) Seto sand [da Uesugi e Kishida 1986].</i> .....  | 113 |
| <u>Figura 3.19</u> | <i>Prove DS-CNL al variare di <math>D_R</math>: (a) da Uesugi e Kishida [1986]; (b) da Lings e Dietz [2005].</i> .....  | 113 |
| <u>Figura 3.20</u> | <i>Risultati di prove di taglio diretto a rigidità normale imposta su tre tipologie di sabbia [Sarri 2001].</i> .....   | 115 |
| <u>Figura 3.21</u> | <i>Effetto <math>R_n</math>: confronto tra valori <math>\tau_{su}/\sigma'_n</math> ottenuti da prove DS-CNS, al variare della <math>D_R</math> e della <math>k</math> imposta.</i> .....                                  | 116 |
| <u>Figura 3.22</u> | <i>Effetto <math>R_n</math>: confronto tra valori <math>\tau_{cv}/\sigma'_n</math> ottenuti da prove DS-CNS, al variare della <math>D_R</math> e della <math>k</math> imposta.</i> .....                                  | 118 |
| <u>Figura 3.23</u> | <i>Effetto <math>R_n</math>: confronto tra valori <math>w_{su}</math> ottenuti da prove DS-CNS, al variare della <math>D_R</math> e della <math>k</math> imposta.</i> .....   | 120 |
| <u>Figura 3.24</u> | <i>Effetto <math>\sigma'_{n0}</math>: confronto tra valori <math>w_{su}</math> ottenuti da prove DS-CNS, al variare della <math>D_R</math> e della <math>k</math> imposta.</i> .....                                      | 122 |
| <u>Figura 3.25</u> | <i>Spostamento <math>w_{su}</math> in funzione della tensione normale iniziale per 3 valori di rigidità <math>k</math> imposta [Balachowski 1995].</i> .....  | 123 |
| <u>Figura 3.26</u> | <i>Spostamento <math>w_{su}</math> in funzione della rigidità normale imposta [Balachowski 1995].</i> .....   | 123 |
| <u>Figura 3.27</u> | <i>Incrementi tensionali <math>\Delta\sigma'_n</math> rispetto a <math>\sigma'_{n0}</math> per prove di interfaccia DS-CNS su sabbia FF a HD con <math>k=1000</math> kPa/mm.</i> .....                                    | 125 |
| <u>Figura 3.28</u> | <i>Incrementi tensionali <math>\Delta\sigma'_n</math> rispetto a <math>\sigma'_{n0}</math> per prove di interfaccia DS-CNS su sabbia Hostun a HD [Balachowski 1995].</i> .....  | 125 |
| <u>Figura 3.29</u> | <i>Rapporti tensionali <math>\Delta\sigma'_n/\sigma'_{n0}</math> rispetto a <math>\sigma'_{n0}</math> per prove di interfaccia DS-CNS su sabbia FF a HD con <math>k=1000</math> kPa/mm.</i> ..                            | 126 |
| <u>Figura 3.30</u> | <i>Rapporti tensionali <math>\Delta\sigma'_n/\sigma'_{n0}</math> rispetto a <math>\sigma'_{n0}</math> per prove di interfaccia DS-CNS su sabbia Hostun a HD [Balachowski 1995].</i> .....                                 | 127 |

|                    |  |     |
|--------------------|--|-----|
| <u>Figura 3.31</u> | <i>Variazioni tensionali <math>\Delta\sigma'_n</math> rispetto a <math>\sigma'_{n0}</math> per prove di interfaccia DS-CNS su sabbia FF a MD con <math>k=100</math> kPa/mm.</i> .....  | 128 |
| <u>Figura 3.32</u> | <i>Variazioni tensionali <math>\Delta\sigma'_n</math> rispetto a <math>\sigma'_{n0}</math> per prove di interfaccia DS-CNS su sabbia FF a MD con <math>k=1000</math> kPa/mm.</i> ..... | 128 |

## CAPITOLO 4

|                    |  |     |
|--------------------|--|-----|
| <u>Figura 4.1</u>  | <i>Coefficiente di attrito laterale medio al variare della snellezza per pali trivellati in terreni granulari [Chen e Kulhawy 1994].</i>   | 131 |
| <u>Figura 4.2</u>  | <i>Correlazione <math>q_c - \tau_{su}</math> per pali trivellati interreni granulari [Alsamman 1995].</i> .....  | 133 |
| <u>Figura 4.3</u>  | <i>Percorso tensionale ottenuto dall'Imperial College Pile infisso in sabbia di Lebanne [Lehane et al. 1993].</i> .....  | 134 |
| <u>Figura 4.4</u>  | <i>Variazione del modulo pressiometrico <math>E_p</math> con la tensione efficace verticale <math>\sigma'_{v0}</math> e la densità relativa [Boulon e Foray 1986]</i> .....  | 136 |
| <u>Figura 4.5</u>  | <i>Andamento del rapporto <math>\Delta\sigma'_n/\sigma'_{n0}</math> rispetto a <math>\sigma'_{n0}</math> per prove di trazione e compressione su pali rugosi trivellati in centrifuga: MD e HD.</i> .....  | 142 |
| <u>Figura 4.6</u>  | <i>Confronto tra <math>\tau_{su/calc}</math> e <math>\tau_{su/mis}</math> per prove in trazione e compressione eseguite su pali modello trivellati in sabbia FF testati in centrifuga: MD e HD e <math>\Delta y=D_{50}</math>.</i> .....                 | 145 |
| <u>Figura 4.7</u>  | <i>Confronto tra <math>\tau_{su/calc}</math> e <math>\tau_{su/mis}</math> per prove in trazione e compressione eseguite su pali modello trivellati in sabbia FF testati in centrifuga: MD e HD e <math>\Delta y=2D_{50}</math>.</i> .....                | 146 |
| <u>Figura 4.8</u>  | <i>Percorso tensionale semplificato per una prova in centrifuga su palo rugoso trivellato in sabbia a MD:(a) curva <math>\tau_s-\sigma'_n</math>.</i> .....  | 147 |
| <u>Figura 4.9</u>  | <i>Percorso tensionale semplificato per una prova in centrifuga su palo rugoso trivellato in sabbia a HD:(a) curva <math>\tau_s-\sigma'_n</math>.</i> .....  | 148 |
| <u>Figura 4.10</u> | <i>Andamento del rapporto <math>\Delta\sigma'_n/\sigma'_{n0}</math> ottenuti dalle (4.18) e (4.19), rispetto a <math>\sigma'_{n0}</math> per prove di trazione e compressione su pali rugosi trivellati in centrifuga: MD e HD.</i> .....                | 152 |
| <u>Figura 4.11</u> | <i>Relazione tra il rapporto <math>\Delta\sigma'_n/\sigma'_{n0}</math> e la <math>D_R</math> per prove di trazione e compressione su pali rugosi trivellati in centrifuga: MD e HD.</i>  | 154 |
| <u>Figura 4.12</u> | <i>Confronto tra <math>\tau_{su/calc}</math> e <math>\tau_{su/mis}</math> per prove in trazione e compressione eseguite su pali modello trivellati in sabbia FF testati in centrifuga: MD e HD e <math>\Delta\sigma'_n</math> da eq.ne (4.22).</i> ..... | 155 |

|                     |  |     |
|---------------------|--|-----|
| <u>Figura 4.13a</u> | Effetto scala $d_m/D_{50}$ su $\tau_{su}$ per prove di compressione su pali modello rugosi trivellati in sabbia FF.....        | 156 |
| <u>Figura 4.13b</u> | Effetto scala $d_m/D_{50}$ su $\tau_{su}$ per prove di trazione su pali modello rugosi trivellati in sabbia FF. ....           | 156 |
| <u>Figura 4.14a</u> | Effetto scala $a/g$ su $\tau_{su}$ per prove di compressione su pali modello rugosi trivellati in sabbia FF. ....              | 157 |
| <u>Figura 4.14b</u> | Effetto scala $a/g$ su $\tau_{su}$ per prove di trazione su pali modello rugosi trivellati in sabbia FF. ....                  | 158 |
| <u>Figura 4.15</u>  | Coefficienti $\beta$ , da prove in centrifuga e in sito, riferiti a terreni granulari sabbiosi: campioni e depositi a MD. .... | 160 |
| <u>Figura 4.16</u>  | Coefficienti $\beta$ , da prove in centrifuga e in sito, riferiti a terreni granulari sabbiosi: campioni e depositi a HD.....  | 161 |

## CAPITOLO 5

|                    |   |     |
|--------------------|---|-----|
| <u>Figura 5.1</u>  | Abaco per la stima di $B_k$ per pali trivellati in sabbia [Berezantzev 1970].....   | 167 |
| <u>Figura 5.2</u>  | Correlazione $q_c-q_{b/crit}$ per pali trivellati in sabbie e ghiaie [Alsamman 1995] .....  | 170 |
| <u>Figura 5.3</u>  | Prova penetrometrica CPT in centrifuga: (a) foto della posizione iniziale della punta penetrometrica; (b) schema della configurazione iniziale di prova. ....   | 171 |
| <u>Figura 5.4</u>  | Effetti scala sulla misura di $q_c$ da prove CPT in centrifuga [Bolton et al. 1999]: (a)effetto del diametro del contenitore di prove; (b) effetto bordo; (c) e (d) effetto della dimensione delle particelle di sabbia. .... | 173 |
| <u>Figura 5.5</u>  | Andamenti $q_c-z_p$ in campioni di sabbia secca FF a MD e HD e correlazione interpolatrice (5.7). ....  | 174 |
| <u>Figura 5.6</u>  | Andamenti $f_s-z_p$ in campioni di sabbia secca FF a MD e HD e correlazione interpolatrice (5.8). ....  | 174 |
| <u>Figura 5.7</u>  | Prove di carico in centrifuga su pali modello trivellati in sabbia a MD e HD: correlazione tra $q_{b/crit}$ e $q_c$ al variare di $w/d$ . ....  | 177 |
| <u>Figura 5.8</u>  | Confronto tra $q_{b/crit/calc}$ dalla (5.9) e $q_{b/crit/mis}$ , in corrispondenza di $w/D$ pari a 5% e 10%: prove di carico in centrifuga a MD e HD... ..  | 177 |
| <u>Figura 5.9</u>  | Prove di carico in centrifuga su pali modello trivellati in sabbia a MD e HD: correlazione tra $N_{crit}$ e $\sigma'_{v0}$ al variare di $w/D$ .....  | 179 |
| <u>Figura 5.10</u> | Confronto tra $q_{b/crit/calc}$ , calcolata dalla (5.10) e (5.11), e $q_{b/crit/mis}$ , in corrispondenza di $w/D$ del 5% e 10%: prove di carico in centrifuga a MD e HD. ....  | 181 |

|                    |   |     |
|--------------------|---|-----|
| <u>Figura 5.11</u> | <i>Meccanismi di rottura attorno alla base del palo trivellato o infisso [da Lancellotta e Calavera 1999].</i>  | 182 |
| <u>Figura 5.12</u> | <i>Rapporti <math>q_{bu}/q_c</math> al variare della <math>\sigma'_{v0}</math> calcolata alla base dei pali modello testati con prove di carico in centrifuga: MD e HD.</i>                               | 183 |
| <u>Figura 5.13</u> | <i>Coefficiente di capacità portante <math>N_q</math> corrispondente ai meccanismi di rottura mostrati in Figura 5.11.</i>  | 184 |
| <u>Figura 5.14</u> | <i>Prove di carico in centrifuga su pali modello trivellati in sabbia a MD e HD: coefficiente <math>N_q</math> stimato per <math>w/D=100\%</math>.</i>  | 186 |
| <u>Figura 5.15</u> | <i>Curve di mobilitazione delle portate di base unitarie, corrette di <math>q_{b0}</math>, per pali modello trivellati in sabbia FF secca deposta a media densità (MD); curva interpolatrice a MD.</i>    | 187 |
| <u>Figura 5.16</u> | <i>Curve di mobilitazione delle portate di base unitarie, corrette di <math>q_{b0}</math>, per pali modello trivellati in sabbia FF secca deposta ad alta densità (HD); curva interpolatrice a HD.</i>    | 187 |
| <u>Figura 5.17</u> | <i>Mobilitazione della portata di base al variare del cedimento normalizzato <math>w/D</math>, durante le prove di carico in centrifuga su pali trivellati in sabbia a MD; curva interpolatrice a MD.</i> | 190 |
| <u>Figura 5.18</u> | <i>Mobilitazione della portata di base al variare del cedimento normalizzato <math>w/D</math>, durante le prove di carico in centrifuga su pali trivellati in sabbia a HD; curva interpolatrice a HD.</i> | 190 |

---

## **INDICE DELLE TABELLE**

---

### **CAPITOLO 1**

|                     |  |    |
|---------------------|--|----|
| <u>Tabella 1.1</u>  | Rapporti di scala in campo gravitazionale artificiale con $\rho^*=1$ ..                      | 10 |
| <u>Tabella 1.2</u>  | Proprietà indice della sabbia FF.....  | 18 |
| <u>Tabella 1.3</u>  | Prove TX-CID e TX-Ck <sub>0</sub> D con bender elements per la stima di G <sub>0</sub> ..... | 21 |
| <u>Tabella 1.4</u>  | Caratteristiche dei pali modello.....  | 23 |
| <u>Tabella 1.5</u>  | Costanti di calibrazione delle celle interne ai pali modello. ....                           | 26 |
| <u>Tabella 1.6a</u> | Quadro riassuntivo delle prove di carico in compressione oggetto di indagine.....            | 35 |
| <u>Tabella 1.6b</u> | Quadro riassuntivo delle prove di carico in trazione oggetto di indagine.....                | 36 |

### **CAPITOLO 2**

|                     |  |    |
|---------------------|--|----|
| <u>Tabella 2.1</u>  | R <sub>n</sub> dei pali modello installati in sabbia FF (D <sub>50</sub> =0.093 mm).....   | 43 |
| <u>Tabella 2.2a</u> | Quadro riassuntivo dei valori di picco delle tensioni tangenziali ottenuti dalle prove di carico in trazione (w <sub>su</sub> in scala modello)..        | 58 |
| <u>Tabella 2.2b</u> | Quadro riassuntivo dei valori di picco delle tensioni tangenziali ottenuti dalle prove di carico in compressione (w <sub>su</sub> in scala modello)..... | 59 |
| <u>Tabella 2.3a</u> | Prove in centrifuga che simulano il Prototipo 1 a MD e HD con carico assiale di compressione e di trazione.....  | 63 |
| <u>Tabella 2.3b</u> | Prove in centrifuga che simulano il Prototipo 2 a MD e HD con carico assiale di compressione e di trazione.....  | 63 |
| <u>Tabella 2.4a</u> | Prove di pull-out su una piastra rugosa [Garnier e König, 1998].<br>.....  | 65 |

|                     |  |    |
|---------------------|--|----|
| <u>Tabella 2.4b</u> | <i>Prove di pull-out su pali modello rugosi [Garnier e König, 1998].</i>   | 65 |
| <u>Tabella 2.5</u>  | <i>Prove di pull-out su pali modello rugosi [Lehane et al., 2005].</i>   | 66 |
| <u>Tabella 2.6</u>  | <i>Prove di torsione su pali modello rugosi [Sartoris et al., 1998].</i>   | 69 |
| <u>Tabella 2.7</u>  | <i>Prove di torsione su pali modello rugosi [Garnier e König, 1998]</i>  | 70 |
| <u>Tabella 2.8a</u> | <i>Prove di carico in trazione e compressione su pali trivellati in vera grandezza – dati da letteratura per siti a media densità.</i> | 71 |
| <u>Tabella 2.8b</u> | <i>Prove di carico in trazione e compressione su pali trivellati in vera grandezza – dati da letteratura per siti ad alta densità.</i> | 73 |

### CAPITOLO 3

|                    |  |     |
|--------------------|--|-----|
| <u>Tabella 3.1</u> | <i>Dati e risultati di prove DS – CNS su sola sabbia FF secca.</i>   | 96  |
| <u>Tabella 3.2</u> | <i>Dati e risultati di prove DS – CNS con piastra di interfaccia di <math>0.03 \leq R_n \leq 0.80</math>.</i>          | 97  |
| <u>Tabella 3.3</u> | <i>Prove DS-CNS sabbia su sabbia e con interfaccia <math>R_n=0.6</math>, aventi <math>\sigma'_{n0}=150</math> kPa.</i> | 103 |
| <u>Tabella 3.4</u> | <i>Prove DS-CNS sabbia su sabbia e con interfaccia <math>R_n=0.6</math>, aventi <math>k=1000</math> kPa/mm.</i>        | 108 |
| <u>Tabella 3.5</u> | <i>Prove di interfaccia DS-CNS su sabbia Hostun HD con piastra rugosa [Balachowski 1995]</i>                           | 126 |

### CAPITOLO 4

|                     |   |     |
|---------------------|---|-----|
| <u>Tabella 4.1a</u> | <i>Quadro riassuntivo dei valori di <math>\Delta\sigma'_n</math> da teoria della cavità espansa per le prove di trazione.</i>   | 140 |
| <u>Tabella 4.1b</u> | <i>Quadro riassuntivo dei valori di <math>\Delta\sigma'_n</math> da teoria della cavità espansa per le prove di compressione.</i>   | 141 |
| <u>Tabella 4.2a</u> | <i>Quadro riassuntivo dei valori di <math>\tau_{su/mis}</math> e <math>\tau_{su/calc}</math> per le prove di trazione, con <math>\Delta\sigma'_n</math> da teoria della cavità espansa.</i>     | 144 |
| <u>Tabella 4.2b</u> | <i>Quadro riassuntivo dei valori di <math>\tau_{su/mis}</math> e <math>\tau_{su/calc}</math> per le prove di compressione, con <math>\Delta\sigma'_n</math> da teoria della cavità espansa.</i> | 145 |
| <u>Tabella 4.3a</u> | <i>Quadro riassuntivo dei valori di <math>\Delta\sigma'_n</math> calcolati con (4.18) e (4.19), per le prove di trazione.</i>   | 149 |
| <u>Tabella 4.3b</u> | <i>Quadro riassuntivo dei valori di <math>\Delta\sigma'_n</math> calcolati con (4.18) e (4.19), per le prove di compressione.</i>   | 150 |

|                     |   |     |
|---------------------|---|-----|
| <u>Tabella 4.4a</u> | Quadro riassuntivo dei valori di $\Delta\sigma'_n$ calcolati con (4.22), per le prove di trazione. ....     | 153 |
| <u>Tabella 4.4b</u> | Quadro riassuntivo dei valori di $\Delta\sigma'_n$ calcolati con (4.22), per le prove di compressione. .... | 154 |
| <u>Tabella 4.5a</u> | Quadro riassuntivo dei valori di $\beta$ per le prove di trazione in centrifuga. ....                       | 162 |
| <u>Tabella 4.5b</u> | Quadro riassuntivo dei valori di $\beta$ per le prove di compressione in centrifuga. ....                   | 163 |

## CAPITOLO 5

|                     |  |     |
|---------------------|--|-----|
| <u>Tabella 5.1</u>  | Stima di $\alpha_c$ al variare del grado di addensamento e di $(w/D)_{crit}$ : dati di letteratura per pali trivellati. ....             | 169 |
| <u>Tabella 5.2</u>  | Prove penetrometriche in centrifuga su campioni di sabbia secca FF. ....   | 171 |
| <u>Tabella 5.3a</u> | Prove di carico in centrifuga su campioni di sabbia secca FF ricostruiti a MD: $q_{b/crit/mis}$ e $q_{b/crit/calc}$ da $q_c$ . ....      | 176 |
| <u>Tabella 5.3b</u> | Prove di carico in centrifuga su campioni di sabbia secca FF ricostruiti a HD: $q_{b/crit/mis}$ e $q_{b/crit/calc}$ da $q_c$ . ....      | 176 |
| <u>Tabella 5.4a</u> | Prove di carico in centrifuga su campioni di sabbia secca FF ricostruiti a MD: $N_{crit}$ . ....   | 178 |
| <u>Tabella 5.4b</u> | Prove di carico in centrifuga su campioni di sabbia secca FF ricostruiti a HD: $N_{crit}$ . ....   | 178 |
| <u>Tabella 5.5a</u> | Prove di carico in centrifuga su campioni di sabbia secca FF ricostruiti a MD: $q_{b/crit/mis}$ e $q_{b/crit/calc}$ da $N_{crit}$ . .... | 180 |
| <u>Tabella 5.5b</u> | Prove di carico in centrifuga su campioni di sabbia secca FF ricostruiti a HD: $q_{b/crit/mis}$ e $q_{b/crit/calc}$ da $N_{crit}$ . .... | 180 |
| <u>Tabella 5.6a</u> | Prove di carico in centrifuga su campioni di sabbia secca FF ricostruiti a MD: $q_{bu}/q_c$ . ....                                       | 182 |
| <u>Tabella 5.6b</u> | Prove di carico in centrifuga su campioni di sabbia secca FF ricostruiti a HD: $q_{bu}/q_c$ . ....                                       | 183 |
| <u>Tabella 5.7a</u> | Prove di carico in centrifuga su campioni di sabbia secca FF ricostruiti a MD: coefficiente di capacità portante $N_q$ . ....            | 185 |
| <u>Tabella 5.7b</u> | Prove di carico in centrifuga su campioni di sabbia secca FF ricostruiti a HD: coefficiente di capacità portante $N_q$ . ....            | 185 |





---

## ***INDICE DEI SIMBOLI***

---

|            |   |
|------------|---|
| $a, b, c$  | coefficienti di interpolazione                                      |
| $A, B, C$  | coefficienti di interpolazione                                      |
| $A_b$      | area di base del palo   |
| $a_c$      | accelerazione centrifuga in un punto generico del modello           |
| $a_{c0}$   | accelerazione centrifuga agente al piano campagna del modello       |
| $A_s$      | area laterale che tiene conto dello spessore della shear band       |
| $A_{sn}$   | area laterale nominale del palo                                     |
| $A_{sni}$  | area laterale nominale del concio i-esimo                           |
| $B$        | diametro della punta penetrometrica miniaturizzata                  |
| $B_k$      | fattore adimensionale di capacità portante                          |
| $C$        | compressione  |
| $CPT$      | prova penetrometrica statica  |
| $C_u$      | coefficiente di uniformità  |
| $D$        | diametro del palo in vera grandezza                                 |
| $D_{50}$   | diametro medio delle particelle                                     |
| $D_{cont}$ | diametro interno del contenitore di prova                           |
| $d_m$      | diametro del palo modello   |
| $D_p$      | diametro del palo prototipo   |
| $D_R$      | densità relativa  |
| $E$        | modulo di Young   |
| $e_0$      | indice dei vuoti a fine consolidazione;                             |
| $e_{cv}$   | indice dei vuoti a volume costante                                  |
| $e_{max}$  | indice dei vuoti massimo della sabbia secca                         |
| $E_{max}$  | modulo di Young tangente a piccolissime deformazioni                |
| $e_{min}$  | indice dei vuoti minimo della sabbia secca                          |
| $E_p$      | modulo pressiometrico   |
| $E_{sec}$  | modulo di Young secante   |
| $f_s$      | resistenza per attrito laterale da una prova penetrometrica statica |
| $g$        | accelerazione di gravità  |
| $G$        | modulo di taglio operativo del terreno                              |
| $G_0$      | modulo di taglio tangente a piccolissime deformazioni               |

|                   |  |
|-------------------|--|
| $G_{0 calc}$      | valore di $G_0$ calcolati da correlazioni empiriche  |
| $G_{0 mis}$       | valori di $G_0$ ottenuti da prove triassiali   |
| $G_s$             | peso specifico dei grani di sabbia   |
| $H$               | altezza del modello  |
| $H_{camp}$        | altezza del campione di sabbia testato   |
| $HD$              | alta densità   |
| $H_m$             | altezza del manicotto che ricopre la cella di carico miniaturizzata                          |
| $k$               | rigidezza normale all'interfaccia  |
| $K$               | coefficiente di spinta della sabbia  |
| $k^*$             | rigidezza della molla in prove di taglio diretto CNS   |
| $k_0$             | coefficiente di spinta a riposo della sabbia   |
| $K_{comp}$        | costante di calibrazione delle celle miniaturizzate per carichi di compressione              |
| $K_{traz}$        | costante di calibrazione delle celle miniaturizzate per carichi di trazione                  |
| $L$               | lunghezza generica   |
| $L/D$             | snellezza del palo   |
| $L_0$             | lunghezza del palo modello immersa in sabbia al netto dello spostamento $w$                  |
| $L_m$             | lunghezza del palo modello immersa in sabbia   |
| $L_p$             | lunghezza del palo prototipo   |
| $M$               | coefficiente angolare della proiezione lineare della curva di stato critico sul piano $p'-q$ |
| $MD$              | media densità  |
| $N$               | rapporto di scala  |
| $N_{crit}$        | fattore di capacità portante "critico"   |
| $N_q$             | fattore di capacità portante   |
| $N_{SPT}$         | numero di colpi determinati da una prove penetrometrica dinamica                             |
| $p'$              | pressione media  |
| $p_0'$            | pressione media a fine consolidazione  |
| $p_a$             | pressione atmosferica  |
| $p'_{cv}$         | tensione media a volume costante;  |
| $p'_f$            | pressione media efficace a rottura   |
| $p_i$             | palo modello generico  |
| $P_i$             | palo prototipo generico  |
| $p_r$             | pressione di riferimento   |
| $q$               | sforzo deviatorico   |
| $q_b$             | portata di base unitaria   |
| $Q_{b0}$          | portata di base residua  |
| $q_{b crit}$      | portata di base critica unitaria   |
| $Q_{b crit}$      | portata di base critica  |
| $q_{b crit calc}$ | portata di base critica unitaria calcolata da correlazione empirica                          |
| $q_{b crit mis}$  | portata di base critica unitaria ottenuta dai risultati di prove in centrifuga               |
| $q_{bu}$          | portata di base ultima unitaria  |
| $Q_{bu}$          | portata di base ultima   |

|             |  |
|-------------|--|
| $q_c$       | resistenza alla punta da una prova penetrometrica statica  |
| $q_{cv}$    | sforzo deviatorico a volume costante   |
| $Q_{est}$   | carico applicato alla testa del palo   |
| $Q_i$       | lettura della cella i, interna al palo   |
| $Q_{i-1}$   | lettura della cella i-1 interna al palo  |
| $Q_s$       | portata laterale   |
| $Q_{sC}$    | portata laterale media sviluppata sul palo per un carico esterno di compressione                           |
| $Q_{sCi}$   | portata laterale sviluppata sul concio i-esimo per un carico esterno di compressione                       |
| $Q_{sT}$    | portata laterale media sviluppata sul palo per un carico esterno di trazione                               |
| $Q_{sTi}$   | portata laterale sviluppata sul concio i-esimo per un carico esterno di trazione                           |
| $Q_{su}$    | portata laterale di picco  |
| $Q_{tot}^C$ | carico esterno di compressione   |
| $Q_{tot}^T$ | carico esterno di trazione   |
| $R$         | raggio della centrifuga  |
| $R_0$       | distanza radiale tra l'asse di rotazione della centrifuga e la superficie libera del modello               |
| $R_a$       | rugosità superficiale media  |
| $R_A$       | distanza radiale di un generico punto A interno al modello dall'asse di rotazione                          |
| $R_n$       | rugosità normalizzata  |
| $R_{n cr}$  | rugosità normalizzata critica  |
| $R_t$       | rugosità totale  |
| $s$         | distanza tra l'asse del penetrometro miniaturizzato ed un generico confine rigido del contenitore di prova |
| $SPT$       | prova penetrometrica dinamica  |
| $T$         | carico di trazione   |
| $u$         | cedimento verticale del campione di sabbia in prova DS-CNS   |
| $u_i$       | cedimento verticale del campione di sabbia in prova DS-CNS misurato dallo strumento i-esimo                |
| $v$         | velocità   |
| $V_s$       | velocità delle onde di taglio  |
| $z$         | profondità   |
| $z_A$       | profondità del generico punto A, interno al modello, dal piano campagna                                    |
| $z_p$       | profondità in scala prototipo  |
| $z_{p max}$ | profondità massima indagata dalla prova CPT, in scala prototipo  |
| $x$         | lunghezza generica   |
| $X$         | generica quantità fisica   |
| $y_0$       | spessore iniziale della banda di taglio  |
| $w$         | cedimento del palo   |
| $W_p$       | peso proprio accelerato del palo modello   |
| $W_{pi}$    | peso proprio accelerato del concio i-esimo   |

|                        |  |
|------------------------|--|
| $\alpha_c$             | fattore di correlazione empirico   |
| $\beta$                | coefficiente di trasferimento dell'attrito laterale  |
| $\beta_{av}$           | coefficiente di trasferimento dell'attrito laterale medio  |
| $\delta'$              | angolo di attrito terreno-inclusione   |
| $\delta'_{cv DS}$      | angolo di attrito a volume costante sabbia-piastra, ottenuto da prove di taglio diretto di interfaccia |
| $\Delta L_i$           | lunghezza del concio i-esimo stimata al netto di $w$   |
| $\delta'_p$            | angolo di attrito di picco tra inclusione e terreno  |
| $\Delta\sigma'_n$      | variazione della tensione efficace normale all'interfaccia   |
| $\Delta\sigma'_{n MD}$ | variazione della tensione efficace normale in prove a media densità                                    |
| $\Delta\sigma'_{n HD}$ | variazione della tensione efficace normale in prove ad alta densità                                    |
| $\Delta y$             | spostamento radiale all'interfaccia  |
| $\Delta\tau$           | rapporto tra tensioni tangenziali  |
| $\varepsilon$          | deformazione   |
| $\varepsilon_a$        | deformazione assiale   |
| $\phi'_{cv DS}$        | angolo di resistenza al taglio a volume costante ottenuto da prove di taglio diretto                   |
| $\phi'_{cv TX}$        | angolo di resistenza al taglio a volume costante ottenuto da prove triassiali                          |
| $\phi'_p$              | angolo di resistenza al taglio di picco  |
| $\phi'_{cv}$           | angolo di resistenza al taglio a volume costante della sabbia  |
| $\gamma$               | peso per unità di volume della sabbia  |
| $\gamma'$              | peso per unità di volume alleggerito della sabbia  |
| $\gamma_d$             | peso per unità di volume della sabbia secca  |
| $\gamma_{max}$         | peso per unità di volume massimo della sabbia secca  |
| $\gamma_{min}$         | peso per unità di volume minimo della sabbia secca   |
| $\Theta$               | angolo di torsione   |
| $\rho$                 | densità del mezzo bifase   |
| $\sigma$               | tensione totale generica   |
| $\sigma'$              | tensione efficace generica   |
| $\sigma'_{ff}$         | pressione efficace a rottura sotto la base del palo  |
| $\sigma'_n$            | tensione normale all'interfaccia   |
| $\sigma'_{n0}$         | tensione efficace geostatica o iniziale normale all'interfaccia  |
| $\sigma'_{nc}$         | tensione normale efficace agente sul fusto del palo dopo l'installazione                               |
| $\sigma'_{n0 m}$       | tensione efficace normale iniziale sulla superficie del manicotto di base                              |
| $\sigma'_{n0 MD}$      | tensione efficace normale iniziale in prove a media densità  |
| $\sigma'_{n0 HD}$      | tensione efficace normale iniziale in prove ad alta densità  |

|                     |   |
|---------------------|---|
| $\sigma'_{n cv}$    | tensione efficace normale mobilitata in corrispondenza della tensione tangenziale a volume costante |
| $\sigma'_{n su}$    | tensione efficace normale mobilitata in corrispondenza della tensione tangenziale di picco          |
| $\sigma'_{v0}$      | tensione efficace verticale geostatica o iniziale   |
| $\tau_{cv}$         | tensione tangenziale mobilitata in condizione di volume costante                                    |
| $\tau_{cv MD}$      | tensione tangenziale a volume costante in prove a media densità                                     |
| $\tau_{cv HD}$      | tensione tangenziale a volume costante in prove ad alta densità                                     |
| $\tau_{res}$        | tensione tangenziale residua media  |
| $\tau_s$            | tensione tangenziale generica   |
| $\tau_{sC}$         | tensione tangenziale media mobilitata in compressione   |
| $\tau_{sC i}$       | tensione tangenziale mobilitata in compressione sul concio i-esimo                                  |
| $\tau_{sT}$         | tensione tangenziale media mobilitata in trazione   |
| $\tau_{sT i}$       | tensione tangenziale mobilitata in trazione sul concio i-esimo                                      |
| $\tau_{sT m}$       | tensione tangenziale mobilitata in trazione sul manicotto di base                                   |
| $\tau_{su}$         | tensione tangenziale di picco   |
| $\tau_{su calc}$    | tensione tangenziale di picco calcolata da formulazione empirica                                    |
| $\tau_{su dm=8mm}$  | tensione tangenziale di picco del palo modello $d_m=8$ mm   |
| $\tau_{su dm=16mm}$ | tensione tangenziale di picco del palo modello $d_m=16$ mm  |
| $\tau_{su MD}$      | tensione tangenziale di picco in prove a media densità  |
| $\tau_{su HD}$      | tensione tangenziale di picco in prove ad alta densità  |
| $\tau_{su mis}$     | tensione tangenziale di picco stimata dai risultati di prove in centrifuga                          |
| $\omega$            | velocità angolare   |

---

## ***INTRODUZIONE***

---

### ***1.1 INQUADRAMENTO DELLA RICERCA***

I meccanismi di trasmissione del carico in pali sottoposti a forze assiali sono piuttosto complessi tanto da giustificare studi di interazione palo-terreno mediante modellazione fisica, simulazione numerica ed analisi di prove su pali in vera grandezza.

La simulazione numerica ha avuto notevoli sviluppi negli ultimi decenni impiegando per il terreno modelli costitutivi sempre più articolati e realistici. Tuttavia alcune difficoltà connesse alla simulazione dei processi di installazione dei pali con conseguenti modifiche delle condizioni geostatiche del terreno, nonché le incertezze legate alla determinazione dei parametri del modello, ne limitano l'applicabilità. Per tale motivo le correlazioni empiriche o semi-empiriche, basate sui risultati delle prove in sito o di laboratorio, continuano a trovare largo impiego nel settore progettuale.

In tale contesto, l'uso di modelli fisici che riproducono in scala ridotta il fenomeno da studiare, può fornire un utile strumento di verifica dei approcci progettuali convenzionali, oltre ad aprire la strada a nuove metodologie.

Questa ricerca di dottorato è orientata allo studio del meccanismo di trasferimento del carico assiale mediante due principali strumenti:

- *modellazione fisica in centrifuga* su pali modello idealmente trivellati in sabbia, caricati assialmente in trazione e compressione
- *prove di taglio diretto a rigidità normale imposta di interfaccia* tra terreno ed inclusione rigida.

Una vasta campagna sperimentale di circa 60 prove in centrifuga è condotta su pali modello di vari diametri e snellezze, idealmente trivellati in campioni di sabbia secca FF ricostruiti a due gradi di addensamento,

medio e alto. I modelli sono sottoposti a carichi assiali di compressione e trazione e ad accelerazioni comprese tra 30g e 160g, simulando una ampia gamma di dimensioni prototipo.

Allo scopo di approfondire la conoscenza del meccanismo che regola il comportamento dell'interfaccia inclusione-terreno, responsabile della mobilitazione dell'attrito, circa 150 prova di taglio diretto a rigidità normale imposta sono eseguite su campioni di sola sabbia FF e sabbia FF con piastre metalliche di differenti rugosità. Le curve di mobilitazione delle tensioni tangenziali, ottenute dalle prove DS-CNS, sono analizzate e confrontate tra loro per valutare come densità relativa, tensione normale al piano di scorrimento, rigidità normale imposta e rugosità dell'inclusione modificano il comportamento all'interfaccia.

I principali obiettivi perseguiti in questa tesi di dottorato possono essere distinti in:

- *obiettivi progettuali*: si riferiscono all'analisi di correlazioni teoriche ed empiriche reperite in letteratura e all'elaborazione di nuove relazioni, derivate dai risultati delle prove di modellazione fisica, mirate alla stima della tensione tangenziale massima, della portata di base unitaria, critica e ultima, e della loro mobilitazione. Sono approfonditi gli effetti di due differenti densità relative del deposito sabbioso e della direzione della forza applicata sul meccanismo di trasmissione del carico assiale dal palo trivellato al terreno granulare circostante.
- *obiettivi sperimentali*: si riferiscono allo studio degli effetti scala che insorgono nella modellazione fisica di pali trivellati in un terreno granulare omogeneo secco.

## ***I.2 STRUTTURA DELLA TESI***

La tesi di dottorato si compone di 6 capitoli.

Nel Capitolo 1 sono richiamati i concetti base della modellazione fisica in scala ridotta, ne sono illustrati i vantaggi e le limitazioni e sono richiamate le leggi di scala attualmente note, che permettono la trasposizione dei risultati ottenuti nel modello al prototipo. Successivamente è presentata la campagna sperimentale di prove di carico su pali modello, partendo dalla descrizione della centrifuga geotecnica IGC impiegata nella ricerca; sono di seguito illustrate la preparazione dei modelli, la strumentazione impiegata e le fasi di prova. Una sintesi delle prove di carico in centrifuga e delle loro caratteristiche identificative completa il capitolo.



Nel Capitolo 2 sono descritti il metodo utilizzato per interpretare le prove in centrifuga e le considerazioni generali sui risultati ottenuti. Tra queste particolare rilievo è dato all'analisi della mobilitazione delle tensioni tangenziali in funzione della direzione del carico assiale applicato al palo. Sono inoltre indagati gli effetti scala sulle tensioni tangenziali di picco legati alla geometria del contenitore di prova e del palo modello. Il cedimento a cui si mobilita l'attrito massimo ha particolare rilevanza sia per aspetti connessi alla modellazione fisica in scala ridotta che per aspetti pratico-progettuali: per tali ragioni è analizzata l'influenza degli effetti scala agenti su di esso.

Il Capitolo 3 introduce la campagna di prove di taglio diretto a rigidezza normale imposta, eseguite su campioni di sola sabbia e in presenza di piastre di interfaccia aventi differenti rugosità. Dopo la descrizione dell'apparecchiatura, alcuni risultati esemplificativi sono commentati per descrivere il comportamento della sabbia al variare delle condizioni di prova, come densità relativa, pressione normale iniziale, rigidezza normale imposta e rugosità della piastra. E' indagato l'effetto della rugosità normalizzata sulla mobilitazione delle tensioni tangenziali e sono riportate alcune considerazioni sulla variazione della tensione normale rispetto al valore di confinamento iniziale.

Il Capitolo 4 analizza i metodi progettuali per la valutazione della tensione tangenziale massima. Gli approcci teorici ed empirici presenti in letteratura sono applicati alle prove in centrifuga ed è completata l'analisi degli effetti scala agenti sulla tensione tangenziale di picco.

Nel Capitolo 5 è riportata una sintesi degli approcci più utilizzati nella pratica progettuale per valutare la capacità portante di base, critica e ultima, di pali trivellati in sabbia. Si presentano due nuove correlazioni semi-empiriche per stimare la portata di base unitaria, note le condizioni in sito e la resistenza alla punta di prove penetrometriche statiche.

Infine il Capitolo 6 riassume le principali conclusioni ottenute dallo studio condotto sui pali trivellati in sabbia e propone alcuni spunti per approfondimenti futuri.



# CAPITOLO 1

---

## MODELLAZIONE FISICA IN CENTRIFUGA GEOTECNICA

---

### 1.1 INTRODUZIONE

Un *modello* è uno strumento che permette di fornire una previsione di un fenomeno reale seppur con un certo grado di approssimazione.

I modelli fisici sono riproduzioni geometricamente scalate di strutture reali (*prototipi*) che, se sollecitati da un sistema di forze in appropriata similitudine meccanica, permettono di ricreare condizioni di equilibrio interne analoghe a quelle sperimentate dal prototipo. Di conseguenza, mediate misure eseguibili sul modello, si determina in modo diretto il comportamento del sistema in vera grandezza, evitando le semplificazioni e le approssimazioni che inevitabilmente si accompagnano all'impiego di approcci teorici.

L'uso di modelli fisici presuppone tuttavia la conoscenza di relazioni concettuali che permettano di estendere correttamente al prototipo quanto misurato sul modello, e la disponibilità di strumenti tecnologici per la realizzazione del modello stesso e per l'esecuzione di misure accurate su di esso.

Il primo che evidenziò l'impossibilità di studiare strutture complesse con la teoria elastica fu l'ingegner Edward Phillips [1869a; 1869b]. Egli riconobbe l'importanza che le forze dovute al peso proprio hanno nel comportamento strutturale: ipotizzando di realizzare il modello con lo stesso materiale del prototipo, ha individuato nella *centrifuga* lo strumento necessario a riprodurre in scala ridotta le condizioni della struttura reale, sviluppando opportune *leggi di scala* per trasferire i risultati ottenuti dalla sperimentazione al fenomeno in vera grandezza.

Bisognerà aspettare però il 1931 per avere i primi risultati documentati di una sperimentazione in centrifuga, condotta presso la Columbia University (USA) e pubblicati da Philip Bucky [1931] riguardanti l'integrità di strutture di sostegno in miniere in rocce: l'analisi è stata spinta fino alle condizioni di rottura attraverso l'incremento della accelerazione centrifuga.

Le prime ricerche in ambito geotecnico, condotte utilizzando la modellazione fisica in centrifuga, hanno riguardato gli studi sviluppati in URSS negli anni '30, ma di essi poco è giunto fino a noi [Davidenkov, 1933; Pokrowsky, 1933; Pokrowsky e Fedorov, 1936]. Solamente negli anni '70 alcuni di questi lavori, tenuti segreti fino ad allora per le loro implicazioni militari, furono presentati e pubblicati: essi riguardavano prevalentemente indagini sugli effetti di esplosioni sotterranee e sulla propagazione di vibrazioni nel terreno.

Una più ampia ed organizzata diffusione dei risultati sperimentali ottenuti dalla modellazione fisica in centrifuga di fenomeni geotecnici, iniziò ad aversi solamente a seguito di conferenze internazionali, come la 7<sup>a</sup> ICSMFE di Città del Messico (1969) la 8<sup>a</sup> ICSMFE di Mosca (1973) durante le quali furono presentati, ad esempio, importanti lavori sulla stabilità dei pendii condotti in parallelo da URSS, Giappone e Gran Bretagna.

Nei decenni seguenti si ebbe un rapido sviluppo delle sperimentazioni a carattere geotecnico, svolte con l'impiego della centrifuga, ed un progressivo e parallelo accrescimento dei metodi numerici di indagine, la cui validità è tuttavia limitata dalla complessità del comportamento del terreno, implementato inevitabilmente in maniera semplificata.

A testimonianza del diffondersi e dell'affermarsi del ruolo della modellazione fisica in centrifuga geotecnica, fu istituito nel 1982, nell'ambito della ICSMFE, un comitato tecnico, TC2, responsabile di curare e organizzare la diffusione di articoli e ricerche attinenti l'argomento.

La sperimentazione con modelli fisici in scala ridotta offre significativi vantaggi se confrontata con una sperimentazione da eseguire su strutture in vera grandezza:

- *costi e tempi di esecuzione delle prove modesti*: per tale motivo fornisce uno strumento di indagine "preliminare" allo scopo di ridurre il numero delle più costose prove in vera grandezza e di permetterne una pianificazione più oculata;
- *riproducibilità di situazioni estreme o rare*: ad esempio offre la possibilità di portare a rottura la struttura, condizione non sempre raggiungibile nella realtà, o di analizzare situazioni di carico particolari;
- *analisi di un problema complesso*: essendo una sperimentazione condotta in laboratorio su modelli appositamente confezionati, può riprodurre le condizioni al contorno che caratterizzano il problema reale, ad esempio, introducendo le variabili in

successione, per analizzare come queste concorrono al raggiungimento del meccanismo finale più complesso, oppure variandole allo scopo di osservare le modifiche che insorgono nella risposta finale sviluppata dalla struttura.

Dai vantaggi presentati, appare evidente che l'impiego della modellazione fisica in scala ridotta in centrifuga geotecnica fornisce un importante strumento di analisi sia per lo studio di opere reali, ingegneristicamente complesse o innovative, nelle quali l'interazione terreno-struttura controlla la risposta dell'opera, sia per condurre ricerche di tipo parametrico volte alla verifica ed eventuale correzione di correlazioni progettuali esistenti, nonché all'individuazione di nuove formulazioni.

Va tuttavia ricordato che l'impiego della modellazione in centrifuga non è privo di difficoltà tra le quali vale la pena citare le due più rilevanti:

- *necessità di individuare gli aspetti significativi del problema analizzato*: essendo in genere impossibile riuscire a riprodurre tutte le caratteristiche del prototipo e delle strutture che eventualmente interagiscono con esso, è necessario selezionare solo gli elementi che effettivamente controllano la risposta dell'opera oggetto di studio;
- *definizione delle leggi che controllano la trasposizione del risultato ottenuto dalla scala modello a quella del prototipo*: tali leggi sono in genere non lineari, pertanto l'estrapolazione al prototipo non è diretta ma deve seguire delle specifiche relazioni di similitudine (*leggi di scala*).

## **1.2 LA MODELLAZIONE FISICA IN UN CAMPO GRAVITAZIONALE ARTIFICIALE**

### **1.2.1 LEGGI DI SCALA**

Per consentire una corretta trasposizione al prototipo delle misure eseguite sul modello è necessario definire le *leggi di scala*.

Esse rappresentano delle relazioni di similitudine tra modello e prototipo ottenute tramite un'analisi di tipo dimensionale che si basa sull'ipotesi che ogni fenomeno fisico possa essere descritto da equazioni dimensionalmente congruenti tra le variabili che lo controllano [Bridgman, 1931; Langhaar, 1951; Palacios, 1964; Kline, 1965; Isaacson e Isaacson, 1975; Wood, 2004].

La regola usata nell'analisi dimensionale è il *teorema "IT"* di Buckingham [1914]: il gruppo di  $h$  variabili, che devono essere prese in considerazione in un problema di analisi dimensionale, all'interno del quale sono rintracciabili le  $m$  variabili primarie indipendenti, può sempre essere ridotto ad un numero  $N$  di gruppi adimensionali, con  $N=h-m$ . Nel metodo non è specificato la forma che compete all'espressione del gruppo adimensionale.

L'uso dell'analisi dimensionale permette di individuare le variabili indipendenti del problema che si vuole studiare e che quindi sono fondamentali da riprodurre nella scala modello.

Le diverse condizioni di similitudine tra modello e prototipo, che devono essere soddisfatte in modellazioni fisiche in scala ridotta, sono state approfonditamente analizzate da numerosi autori [Roscoe, 1968; Rowe et al., 1977; Schofield, 1980; Baldi et al., 1989; Taylor, 1995; Butterfield, 1999 e 2000] e non saranno nel seguito nuovamente commentate.

In generale, per tutte le quantità che descrivono i fenomeni statici della meccanica dei terreni, si individua un rapporto, detto *fattore di scala*:

$$X = \frac{X_{prototipo}}{X_{modello}} \quad [-] \quad (1.1)$$

Con:

$X$  = generica quantità fisica del problema

Schematizzando il terreno come un mezzo bifase (solido e fluido) ed assumendo i grani incompressibili, il metodo dell'analisi dimensionale è applicato alle equazioni che regolano il comportamento del terreno in fenomeni di tipo statico (eq.ni di continuità per mezzo bifase; eq.ne del moto per la fase fluida; eq.ne del moto per il mezzo bifase; legame costitutivo; eq.ne degli sforzi efficaci e delle piccole deformazioni). Imponendo che tali equazioni di base siano applicate al modello come al prototipo, sono derivate dalle eguaglianze i rapporti di similitudine ed individuate le quattro *grandezze indipendenti del problema statico* per le quali sono definiti altrettanti *fattori di scala fondamentali*:

- $x^*$       fattore di scala delle lunghezze
- $\rho^*$       fattore di scala della densità del mezzo bifase
- $\epsilon^*$       fattore di scala delle deformazioni
- $g^*$       fattore di scala del campo gravitazionale artificiale

Tutte le altre grandezze presenti in un problema geotecnico, purché di natura statica, possono essere espresse come funzione di queste quattro variabili indipendenti.

Per costruire un modello in scala ridotta ( $x^* > 1$ ) si deve scegliere un corretto  $\rho^*$ : poiché il comportamento meccanico del terreno dipende fortemente dalla sua natura (dimensione e distribuzione dei grani, mineralogia, rigidità delle diverse fasi), sostituire il materiale reale con uno di altra natura, anche se questo ne riproduce correttamente la densità, comporta delle differenze nella risposta complessiva. Appare pertanto necessario che il terreno utilizzato per confezionare il modello sia lo stesso presente nella situazione in vera grandezza; di conseguenza il fattore di scala della densità del terreno  $\rho^*$  deve essere uguale a 1.

Assunto quindi  $\rho^* = 1$ , dai rapporti generali di similitudine, il fattore di scala per gli sforzi è:

$$\sigma^* = g^* x^* \quad [-] \quad (1.2)$$

Un obiettivo fondamentale da perseguire è quello di ottenere l'eguaglianza in campo di sforzi tra modello e prototipo: ipotizzando che il comportamento del terreno sia completamente controllato dagli sforzi, diventa possibile simulare correttamente nel modello il comportamento reale del materiale senza conoscerne a priori la legge sforzi-deformazioni:

$$\sigma^* = 1 \quad [-] \quad (1.3)$$

Ottenibile solo se:

$$g^* x^* = 1 \quad [-] \quad (1.4)$$

Quindi, se un modello scalato geometricamente di un fattore  $N$  rispetto alle dimensioni del prototipo sperimenta un campo artificialmente accelerato di  $N$  volte rispetto a quello di gravità, esso sviluppa tensioni uguali a quelle del prototipo, a condizione che il terreno utilizzato sia lo stesso ( $\rho^* = 1$ ):

$$\sigma_v^* = \rho^* g^* L^* \rightarrow \begin{cases} g^* = N \\ L^* = 1/N \\ \rho^* = 1 \end{cases} \rightarrow \sigma_v^* = 1 \quad [-] \quad (1.5)$$

Inoltre, nell'ipotesi di  $\rho^* = 1$  si ottiene l'uguaglianza del campo di deformazioni tra modello e prototipo ( $\epsilon^* = 1$ ). Si può quindi concludere che, se il terreno utilizzato per il confezionamento del modello è lo stesso presente nel prototipo, il comportamento tenso-deformativo dei

due sarà il medesimo. Tale conclusione rimane valida fintanto che il terreno naturale non abbia una macro-struttura, non presenti fessurazioni, inclusioni o percorsi di drenaggio preferenziali. Tali situazioni non sono riproducibili nel modello a causa del rimaneggiamento che il terreno naturale subisce per il confezionamento del modello stesso.

In Tabella 1.1 sono riassunti i fattori di scala relativi alle proprietà fisiche fondamentali nell'interpretazione del comportamento del terreno.

| GRANDEZZA FISICA |                            | RAPPORTO DI SCALA |
|------------------|----------------------------|-------------------|
| x                | lunghezza                  | N                 |
| $x^2$            | area                       | $N^2$             |
| $x^3$            | volume                     | $N^3$             |
| g                | accelerazione              | 1/N               |
| M                | massa                      | $N^3$             |
| F                | forza                      | $N^2$             |
| E                | energia                    | $N^3$             |
| $\rho$           | densità del terreno        | 1                 |
| $\sigma$         | sforzi (totali o efficaci) | 1                 |
| $\epsilon$       | deformazioni del terreno   | 1                 |
| u                | spostamenti del terreno    | N                 |
| $\dot{u}$        | velocità del terreno       | 1                 |
| $\ddot{u}$       | accelerazioni del terreno  | 1/N               |
| t                | tempo                      | N                 |

-Tabella 1.1 – Rapporti di scala in campo gravitazionale artificiale con  $\rho^*=1$ .

I fattori di scala, riportati in Tabella 1.1, sono ottenuti schematizzando il terreno come un continuo il cui comportamento è governato solamente dallo stato tensionale medio, trascurando il comportamento degli elementi particellari. I rapporti di scala non sono più validi nel caso di fenomeni il cui comportamento sia assimilabile al discontinuo. Un tipico esempio è dato dai meccanismi in cui insorgono “*bande di taglio*” (*shear bands*): i risultati ottenuti da diversi modelli riproducenti lo stesso prototipo non sono concordi tra loro [Tatsuoka, 1989] e il comportamento esibito dal modello si discosta da quello osservabile per il prototipo.

Un tipico esempio di meccanismo che induce la formazione della shear band, interpretabile come una problema al discontinuo, è la mobilitazione delle tensioni tangenziali sul fusto del palo: lo sviluppo dell'attrito è dovuto a scorrimenti relativi palo-terreno che, essendo



controllati dal comportamento dell'interfaccia, seguono leggi non lineari con lo spostamento (risposta rammollente delle deformazioni). A causa della discontinuità che si genera nella zona di interfaccia tra palo e terreno insorge un *effetto scala* tra modello e prototipo che porta ad un diverso sviluppo della tensione al progredire del cedimento. Questa differente comportamento rende complessa la trasposizione del valore dello spostamento di interfaccia alla scala reale.

### 1.2.2 DISTORSIONE DEL CAMPO GRAVITAZIONALE

Stabilendo la velocità angolare  $\omega$  di rotazione della centrifuga, si definisce l'accelerazione centrifuga  $a_{c0}$  che agisce su un certo piano, ad esempio, sulla superficie libera del modello, come:

$$a_{c0}=Ng=R_0\omega^2 \quad [LT^{-2}] \quad (1.6)$$

Con:

$N = a_{c0}/g$  = rapporto tra l'accelerazione centrifuga e quella di gravità alla superficie libera del modello

$g$  = accelerazione di gravità pari a  $9.81 \text{ m/s}^2$

$R_0$  = distanza radiale tra l'asse di rotazione della centrifuga e la superficie libera del modello

$\omega$  = velocità angolare

L'accelerazione centrifuga indotta dalla rotazione della macchina è quindi un vettore avente in ogni punto del modello direzione coincidente con il raggio di rotazione e modulo pari ad  $a_c$ , funzione della distanza radiale del punto a cui si fa riferimento dall'asse della macchina. Questo induce nel modello *due distorsioni geometriche* che non potendo essere eliminate devono essere quantificate.

La prima riguarda la *curvatura del campo di accelerazione* dovuta alla formazione di superfici equipotenziali (a pari  $a_c$ ) aventi direttrice cilindrica (Figura 1.1a): punti posti alla stessa profondità dalla superficie libera del modello sperimentano tensioni differenti. L'effetto di questa distorsione sul campo tensionale indotto nel modello è tuttavia trascurabile per le centrifughe di grande raggio ( $R > 1.5\text{m}$ ) in quanto è minimizzato dalla ridotta dimensione del modello stesso, rispetto al raggio di rotazione della centrifuga, oltre che dalla sua distanza di fissaggio rispetto l'asse di rotazione della macchina.

Il secondo effetto di distorsione riguarda lo *sviluppo delle tensioni verticali nel modello* e deriva dalla proporzionalità dell'accelerazione centrifuga dal raggio di rotazione.

Ipotizzando, per semplicità, un terreno secco, la tensione verticale nel campo gravitazionale terrestre si esprime in funzione della profondità di interesse  $z$  dal piano campagna:

$$\sigma'_{v0} = \int_0^z \gamma \, dz = \int_0^z \rho g \, dz \quad [FL^{-2}] \quad (1.7)$$

Con:

$\gamma$  = peso per unità di volume del terreno

$\rho$  = densità del terreno

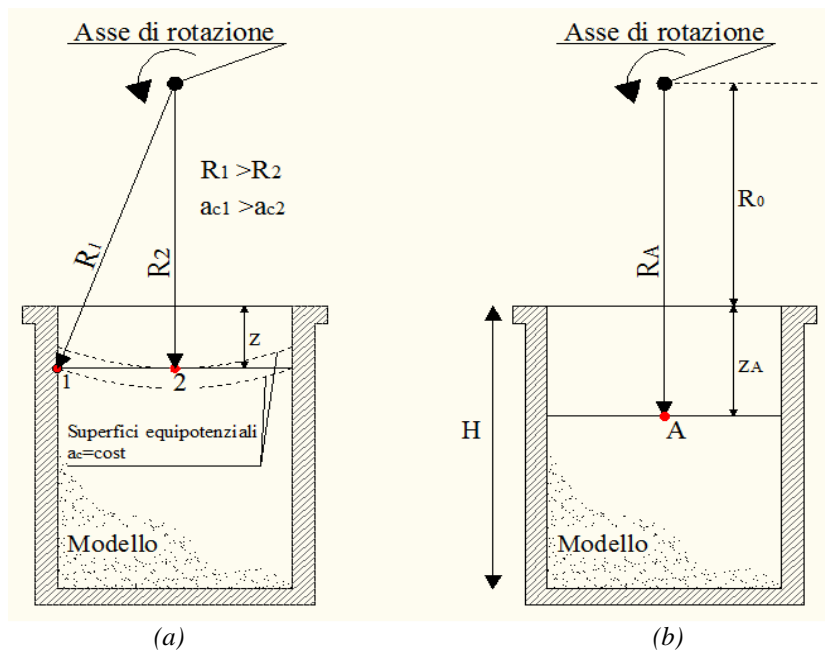
Poiché  $a_c$  è proporzionale alla distanza radiale del generico punto di interesse  $A$  dall'asse di rotazione (Figura 1.1b), nel campo artificialmente accelerato la (1.7) diventa:

$$\sigma'_{v0} = \int_{R_0}^{R_A} \rho N g \, dR = \int_{R_0}^{R_A} \rho \omega^2 R \, dR = \frac{1}{2} \rho \omega^2 (R_A^2 - R_0^2) \quad [FL^{-2}] \quad (1.8)$$

Con:

$R_A$  = distanza radiale di un generico punto  $A$  interno al modello dall'asse di rotazione, definibile come:

$$R_A = R_0 + z_A \quad [L] \quad (1.9)$$



-Figura 1.1 – Curvatura del campo di accelerazione centrifugo (a); elemento di terreno  $A$  interno al modello (b).

Integrando la (1.8) si ottiene:

$$\sigma'_{v0} = \rho g N z_A \left( 1 + \frac{z_A}{2R_0} \right) = \rho g z \left( 1 + \frac{z_A}{2R_0} \right) \quad [FL^{-2}] \quad (1.10)$$

Con:

$z = N z_A$  = profondità del punto A in scala prototipo

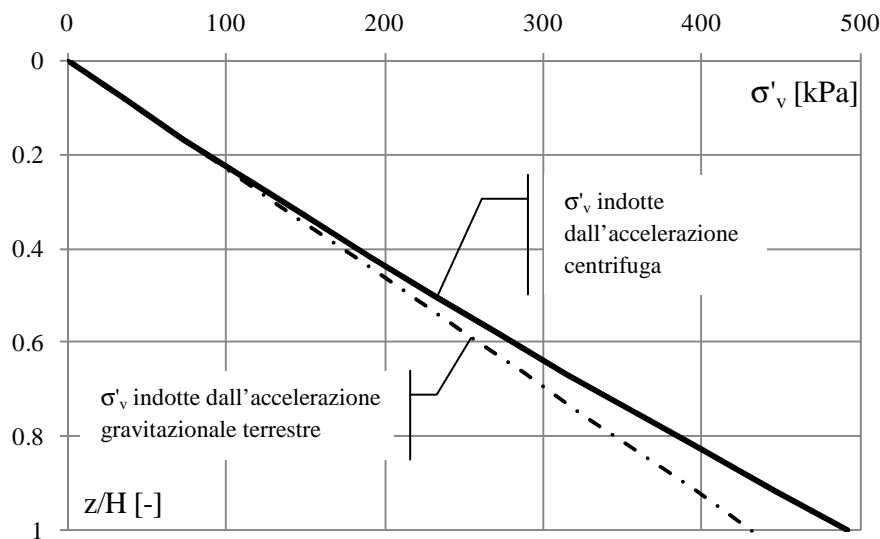
Nota la tensione verticale efficace (1.10) che compete al generico punto A, è possibile calcolare la tensione che agisce in direzione orizzontale, come:

$$\sigma'_{n0} = k_0 \sigma'_{v0} \quad [FL^{-2}] \quad (1.11)$$

Con:

$k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv}$  = coefficiente di spinta a riposo del terreno granulare assunto come normalconsolidato [Jaky, 1948] con  $\phi'_{cv}$  [°], angolo di resistenza al taglio a volume costante del terreno

La Figura 1.2 mostra la variazione con la profondità  $z$ , normalizzata rispetto all'altezza  $H$  del modello, del campo delle tensioni verticali  $\sigma'_v$ : quelle indotte dal campo gravitazionale terrestre presentano un andamento lineare a differenza di quelle riprodotte in centrifuga che variano in modo non lineare con  $z$ . Lo scarto aumenta al crescere della distanza radiale dall'asse di rotazione fino ad un valore massimo alla base del modello.



-Figura 1.2 – Confronto tra tensioni verticali indotte dal campo gravitazionale e quelle in centrifuga.

In conclusione, poiché i problemi di distorsione che si incontrano nella modellazione in centrifuga derivano principalmente dal rapporto tra le dimensioni del modello e quelle della macchina, è indispensabile mantenere le dimensioni fisiche del modello sufficientemente piccole rispetto a quelle della centrifuga per minimizzare gli effetti indotti dalla distorsione.

### ***1.3 LA CENTRIFUGA GEOTECNICA DEL I.S.M.GEO.***

La campagna sperimentale sviluppata durante il triennio di dottorato è stata condotta presso l'Istituto Sperimentale Modelli GEOTecnici I.S.M.GEO. di Seriate (BG), dotato della prima ed unica centrifuga geotecnica operante in Italia.

La IGC (ISM GEO geotechnical centrifuge) è una centrifuga di medie dimensioni con una capacità di 240 g-ton, progettata per raggiungere una velocità limite di 600 g con un carico massimo di lavoro di 400 kg.

Essa è composta da un braccio rotante simmetrico in acciaio ad alta resistenza, che monta alle estremità due cestelli basculanti: in uno è fissato il contenitore del modello mentre nell'altro una serie di contrappesi per garantire l'equilibrio durante la fase di volo (Fig. 1.3). Successivamente alla sua realizzazione, per motivi aerodinamici, è stata introdotta una carenatura metallica che, ruotando in modo solidale al braccio, riduce la potenza dissipata per attrito con l'aria.

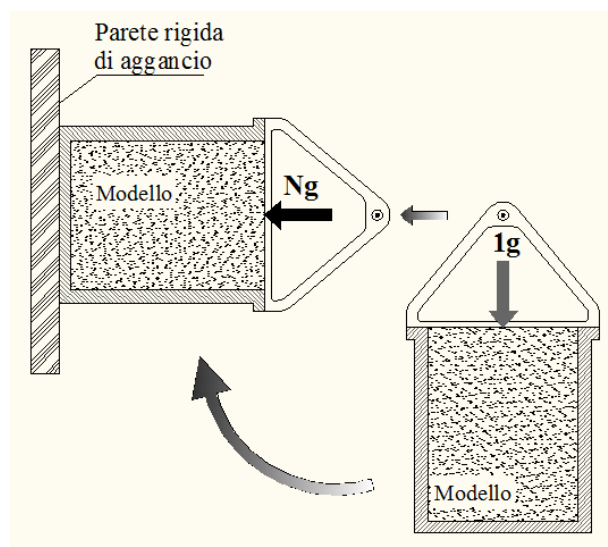


*-Figura 1.3 – Particolare del braccio rotante e di parte della pesante copertura metallica al piano di calpestio.*

La forma caratteristica del braccio rotante presenta alcuni vantaggi:

- minimizzare la distorsione del campo centrifugo sui modelli;
- fornire un piano di supporto del cestello basculante sufficientemente rigido;
- facilitare il posizionamento del modello;
- facilitare il posizionamento degli strumenti di misura vicino all'asse di rotazione;
- permettere una visione laterale del modello durante le fasi di prova;
- eliminare il problema dell'accelerazione complementare di Coriolis.

La distanza nominale, o raggio nominale del modello, dall'asse di rotazione della centrifuga è 2 m e le sue dimensioni massime sono: 1000 mm di lunghezza, 500 mm di larghezza e 600 mm di altezza. Esso è fissato al cestello basculante incernierato al braccio rotante: la posizione iniziale del cestello è verticale mentre, a seguito dell'incrementarsi dell'accelerazione centrifuga, esso ruota attorno al perno di supporto fino a disporsi orizzontalmente ed ad agganciarsi alla parete di supporto (Fig. 1.4).



*-Figura 1.4 – Meccanismo di movimentazione del cestello basculante.*

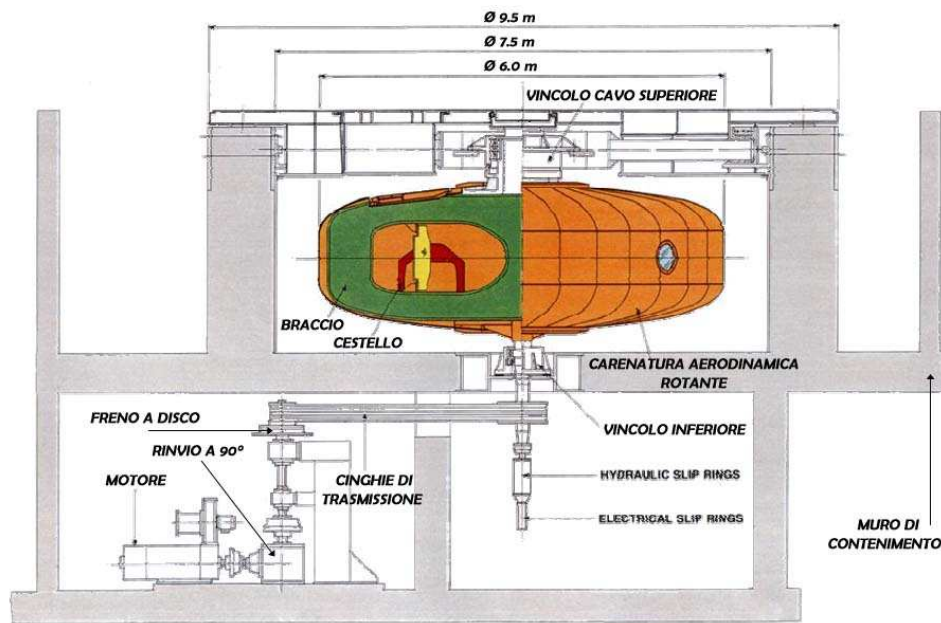
Il sistema di propulsione e trasmissione della macchina è composto da:

- motore a corrente continua;
- trasmissione ortogonale;

- albero motore;
- sistema di trasmissione composta da una cinghia trapezoidale e puleggia;
- sistema di cuscinetti su cui grava il peso della centrifuga.

La centrifuga è inoltre circondata da un muro di contenimento anulare in cemento armato di 1 m di spessore (Fig. 1.5) le cui pareti interne sono rivestite da pannelli di raffreddamento: esso è progettato per sopportare l'impatto di una massa di 1 ton espulsa alla velocità angolare massima.

Il tutto è poi contenuto in un ulteriore pozzo di cemento armato chiuso, per motivi di sicurezza, da una pesante copertura metallica posta a livello del piano di calpestio.



-Figura 1.5 – Sezione trasversale della centrifuga geotecnica IGC del I.S.M.GEO. [Fioravante, 1994].

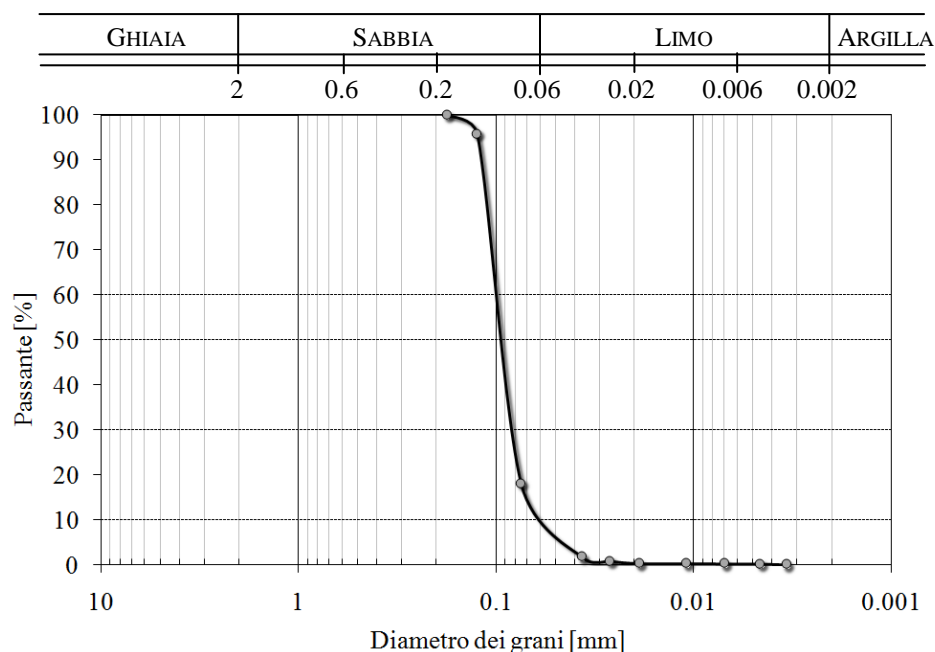
Un operatore altamente specializzato aziona e controlla la centrifuga, monitorando i parametri fondamentali di funzionamento della macchina: velocità di rotazione del braccio, temperatura dei liquidi di lubrificazione, bilanciamento, corretto posizionamento del cestello. E' inoltre in grado di azionare e controllare gli strumenti di prova, che durante la fase di volo sono necessari al conseguimento degli obiettivi prefissati.

All'interno della sala di controllo è presente un complesso sistema per l'acquisizione dei dati, letti dagli strumenti di misura posti sul modello stesso, oltre ad un monitor che mostra le fasi di prova riprendendo l'interno della centrifuga da due diverse angolazioni tramite telecamere miniaturizzate, montate una sul braccio rotante, per una visione di insieme del modello, e l'altra sul contenitore stesso del modello, per una visione di dettaglio.

Per maggiori informazioni sulla centrifuga geotecnica IGC si rimanda a Baldi et al. [1988].

#### **1.4 IL MATERIALE DI PROVA: SABBIA FF**

Per la sperimentazione si è utilizzata una sabbia, chiamata FF, molto fine ottenuta per frantumazione e setacciatura di rocce di cava. E' una sabbia uniforme formata da particelle sub-angolari composte per il 98.2% da quarzo, 1.3% da feldspati e 0.5 % da mica. La sua curva granulometrica è mostrata in Figura 1.6.



*-Figura 1.6– Curva granulometrica della sabbia FF.*

In Tabella 1.2 sono riassunte le principali proprietà indice della sabbia testata.

| Sabbia | $\gamma_{\min}^*$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $\gamma_{\max}^{**}$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $e_{\max}$<br>[-] | $e_{\min}$<br>[-] | $G_s$<br>[-] | $D_{50}$<br>[mm] | $C_u$<br>[-] | $\phi'_{cv}$<br>[°] |
|--------|---|--|-------------------|-------------------|--------------|------------------|--------------|---------------------|
| FF     | 11.58                                     | 14.78  | 1.211             | 0.732             | 2.61         | 0.093            | 1.88         | 33                  |

\* ASTM D4253-83

\*\* ASTM D4254-83

-Tabella 1.2 – Proprietà indice della sabbia FF.

Con:

$\gamma_{\min}$ ,  $\gamma_{\max}$  = peso per unità di volume minimo e massimo della sabbia secca

$e_{\min}$ ,  $e_{\max}$  = indice dei vuoti minimo e massimo della sabbia secca

$G_s$  = peso specifico dei grani di sabbia

$D_{50}$  = diametro medio delle particelle

$C_u$  = coefficiente di uniformità

$\phi'_{cv}$  = angolo di resistenza al taglio a volume costante ottenuto da prove triassiali con rottura in compressione per carico

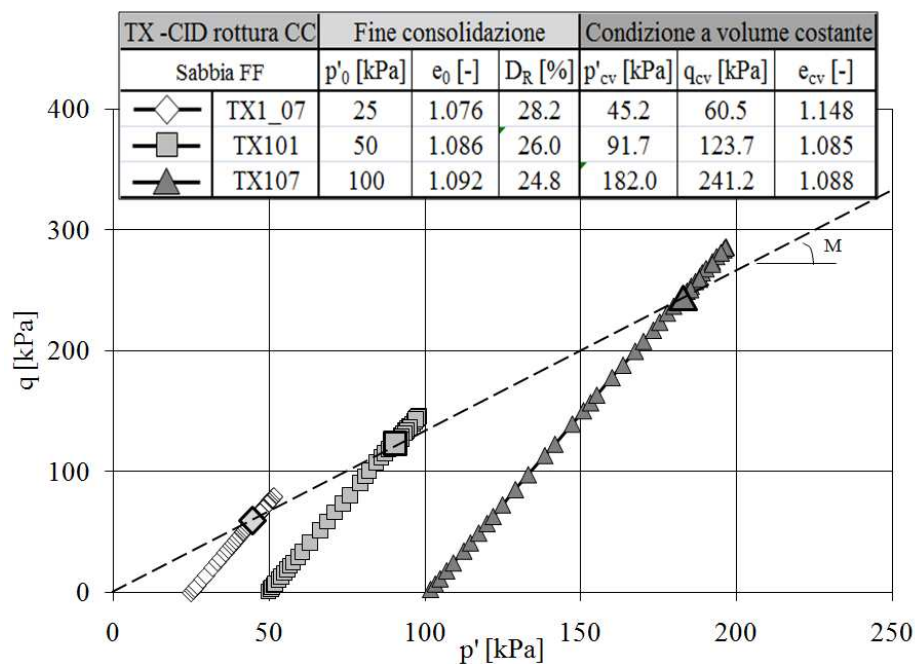
A titolo di esempio, si mostrano i risultati ottenuti dall'interpretazione di 3 prove triassiali consolidate isotropicamente e portate a rottura in condizione drenata (TX-CID) in compressione per carico (CC).

In Figura 1.7a sono riassunte le caratteristiche a fine consolidazione ( $p'_0$ = pressione di consolidazione;  $e_0$ = indice dei vuoti a fine consolidazione;  $D_R$ = densità relativa a fine consolidazione) e a volume costante o stato critico ( $p'_{cv}$  = tensione media a volume costante;  $q_{cv}$  = sforzo deviatorico a volume costante;  $e_{cv}$ = indice dei vuoti a volume costante) delle 3 prove analizzate e sono diagrammati i percorsi tensionali nel piano degli invarianti  $q$ - $p'$  ( $q$  sforzo deviatorico;  $p'$  pressione media o sferica). Per ciascuna prova i punti ingranditi rappresentano i valori a volume costante interpolabili con una retta di intercetta nulla e coefficiente angolare  $M$ .

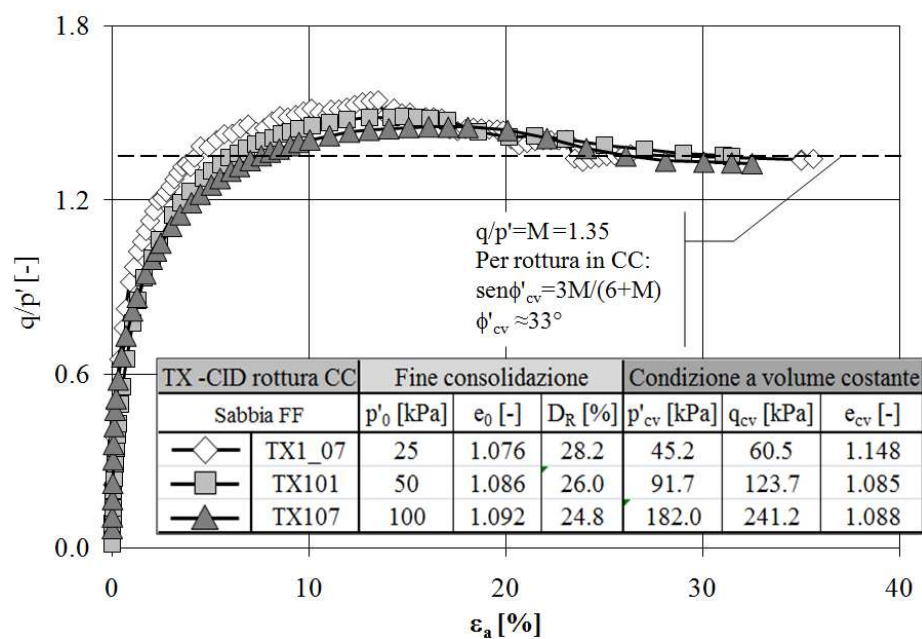
In Figura 1.7b sono mostrati gli andamenti del rapporto normalizzato degli invarianti  $q/p'$  rispetto alla deformazione assiale  $\epsilon_a$  sperimentata da ciascun provino: le curve tendono a sovrapporsi e a raggiungere la condizione di stato critico per  $q/p' \approx 1.35$ , corrispondente ad un angolo di resistenza al taglio a volume costante  $\phi'_{cv} \approx 33^\circ$  (Tab. 1.2).

Per ulteriori informazioni sulla caratterizzazione geotecnica della sabbia FF, basata su prove triassiali con rottura drenata e non drenata e pressioni di confinamento  $p'_0$  variabili tra 25 kPa e 685 kPa, si rimanda a Colombi [2005].





-Figura 1.7a – Percorsi tensionali  $q$ - $p'$  di tre prove TX-CID con rottura CC eseguite su provini saturi di sabbia FF.



-Figura 1.7b – Percorsi tenso-deformativi  $q/p'$ - $\epsilon_a$  di tre prove TX-CID con rottura CC eseguite su provini saturi di sabbia FF.

L'impiego dei bender elements nell'apparato strumentale di prove triassiali, condotte presso il *laboratorio di indagine sui terreni* del I.S.M.GEO. su provini di sabbia FF, rende possibile stimare il valore di  $G_0$ , modulo di taglio tangente a piccolissime deformazioni, al variare delle condizioni al contorno. Una serie di prove triassiali su provini saturi consolidati isotropicamente e anisotropicamente, in condizioni  $k_0$ , sono stati portati a rottura in compressione per carico drenata (TX-CID e TX-Ck<sub>0</sub>D). Le caratteristiche delle prove, riferite alla fine consolidazione e istante di inizio della fase di rottura, sono riassunte in Tabella 1.3.

Le misure della velocità delle onde di taglio,  $V_s$ , effettuate con i bender elements, permettono di calcolare i valori del modulo di taglio tangente a piccolissime deformazioni,  $G_0$ . Tali valori sono impiegati per tarare i coefficienti di una correlazione empirica, strutturata come quella proposta da Hardin e Blandford [1989] e da Lo Presti [1995], in grado di stimare  $G_0$  in funzione dello stato tensionale agente e dell'indice dei vuoti del materiale:

$$G_0 = A e_0^B p_0'^C p_r^{(1-C)} \quad [FL^{-2}] \quad (1.12)$$

Con:

$A = 190$

$B = -1.3$

$C = 0.5$

$p_r = 1 \text{ MPa}$ , pressione di riferimento

$p_0' =$  pressione media a fine consolidazione

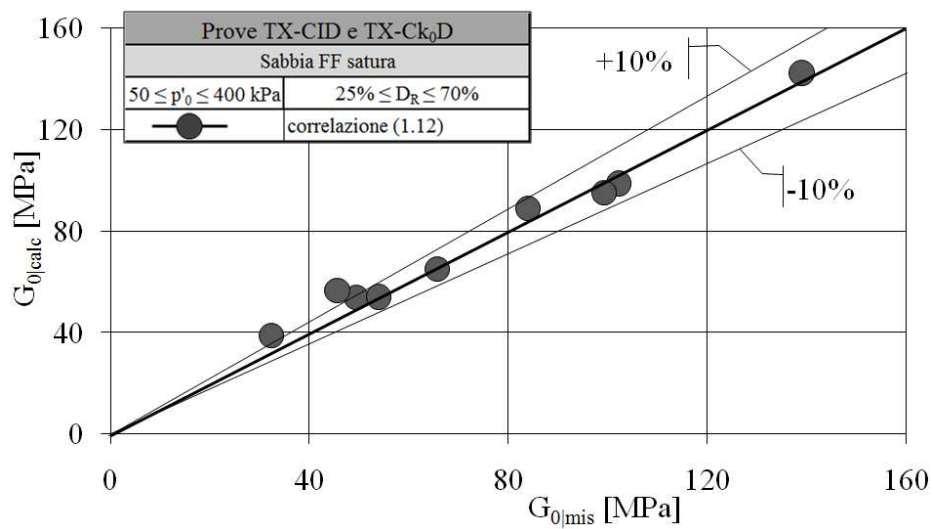
I valori di  $G_0$ , ricavati dalla (1.12) sono riportati in Tabella 1.3 ed indicati come  $G_{0|calc}$ . Il confronto tra i valori calcolati e quelli misurati,  $G_{0|mis}$  (Tab. 1.3), è mostrato in Figura 1.8, dove si evince un errore minore del 10%.

In Figura 1.9 si riportano, a titolo di esempio, due curve di decadimento del modulo di Young  $E$  ottenute dalle prove TX-CID 107 e TX-CID 134, eseguite a bassa ( $\approx 25\%$ ) ed alta ( $\approx 70\%$ ) densità relativa con pressioni di confinamento di 100 kPa e 400 kPa rispettivamente.

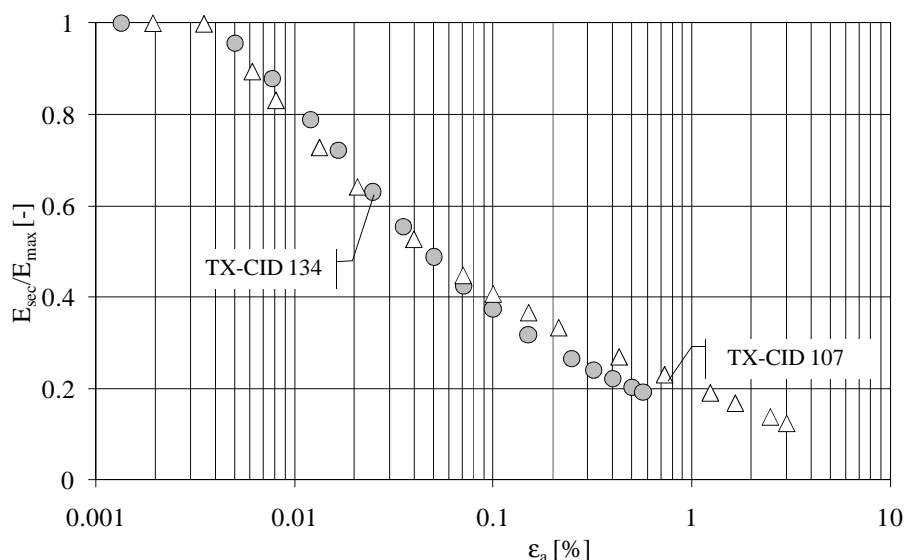
Le prove selezionate sono state scelte in quanto individuano intervalli del grado di addensamento e di confinamento simili a quelli successivamente riprodotti in centrifuga.

| Prova                    | $p_0'$<br>[kPa] | $e_0$<br>[-] | $D_R$<br>[%] | $G_{0 mis}$<br>[MPa] | $G_{0 calc}$<br>[MPa] |
|--------------------------|-----------------|--------------|--------------|----------------------|-----------------------|
| TX CID 101               | 50              | 1.073        | 28.8         | 32.3                 | 38.6                  |
| TX Ck <sub>0</sub> D 112 | 73              | 1.029        | 38.0         | 102.2                | 98.7                  |
| TX CID 102               | 100             | 1.088        | 25.6         | 49.4                 | 53.8                  |
| TX CID 107               | 102             | 1.092        | 24.8         | 53.9                 | 54.0                  |
| TX CID 137               | 100             | 0.941        | 56.3         | 65.7                 | 65.0                  |
| TX CID 103               | 251             | 1.057        | 32.8         | 84.0                 | 89.0                  |
| TX CID 121               | 250             | 0.999        | 44.1         | 99.2                 | 95.0                  |
| TX Ck <sub>0</sub> D 140 | 291             | 0.931        | 58.5         | 45.6                 | 56.4                  |
| TX CID 134               | 400             | 0.878        | 69.6         | 139.0                | 142.3                 |

-Tabella 1.3 – Prove TX-CID e TX-Ck<sub>0</sub>D con bender elements per la stima di  $G_0$ .



-Figura 1.8 – Confronto tra  $G_{0|mis}$  e  $G_{0|calc}$  dalle correlazioni (1.12) e (1.13).



-Figura 1.9 – Curve di decadimento del modulo di Young da prove TX-CID.

### 1.5 PALI MODELLO

Per la sperimentazione in scala ridotta sono utilizzati 4 pali modello metallici in grado di riprodurre una vasta gamma di dimensioni prototipo. La scelta di impiegare modelli di diametro e lunghezza differenti ha permesso di indagare prototipi con diversi valori di snellezza  $L/D$  e diverso rapporto  $d_m/D_{50}$  (con  $d_m$  diametro del palo modello).

I pali modello impiegati, tutti a punta chiusa e sommità libera, sono sia strumentati internamente che non strumentati. La loro geometria è riassunta in Tabella 1.4.

I pali strumentati hanno fusto in alluminio con 2 o 4 celle di carico interne in acciaio: tutti i modelli hanno una cella a metà della lunghezza immersa in sabbia e una in corrispondenza della base (Fig. 1.10a), inoltre, quello strumentato in 4 sezioni, presenta una cella compresa tra le due precedenti e una in posizione intermedia tra piano campagna e metà lunghezza del palo modello (Fig. 1.10b).

Il palo non strumentato è realizzato interamente in alluminio.

La Figura 1.10a mostra i pali modello impiegati nella sperimentazione; il palo da 10 mm di diametro nella configurazione con 4 celle di carico è rappresentato in Figura 1.10b.

| $d_m$<br>[mm] | $L_m$<br>[mm] | $L_m/d_m$<br>[-] | Materiale | N° celle<br>carico | $H_m$<br>[mm] | $R_t$<br>[μm] |
|---------------|---------------|------------------|-----------|--------------------|---------------|---------------|
| 8             | 160           | 20               | All/Acc   | 2                  | 26.3          | 130           |
| 10            | 245           | 24.5             | All/Acc   | 2                  | 20.0          | 100           |
|               |               |                  |           | 4                  |               |               |
| 16            | 320           | 20               | All/Acc   | 2                  | 35.0          | 125           |
| 32            | 320           | 10               | Alluminio | 0                  | -             | 80            |

*-Tabella 1.4 – Caratteristiche dei pali modello.*

Con:

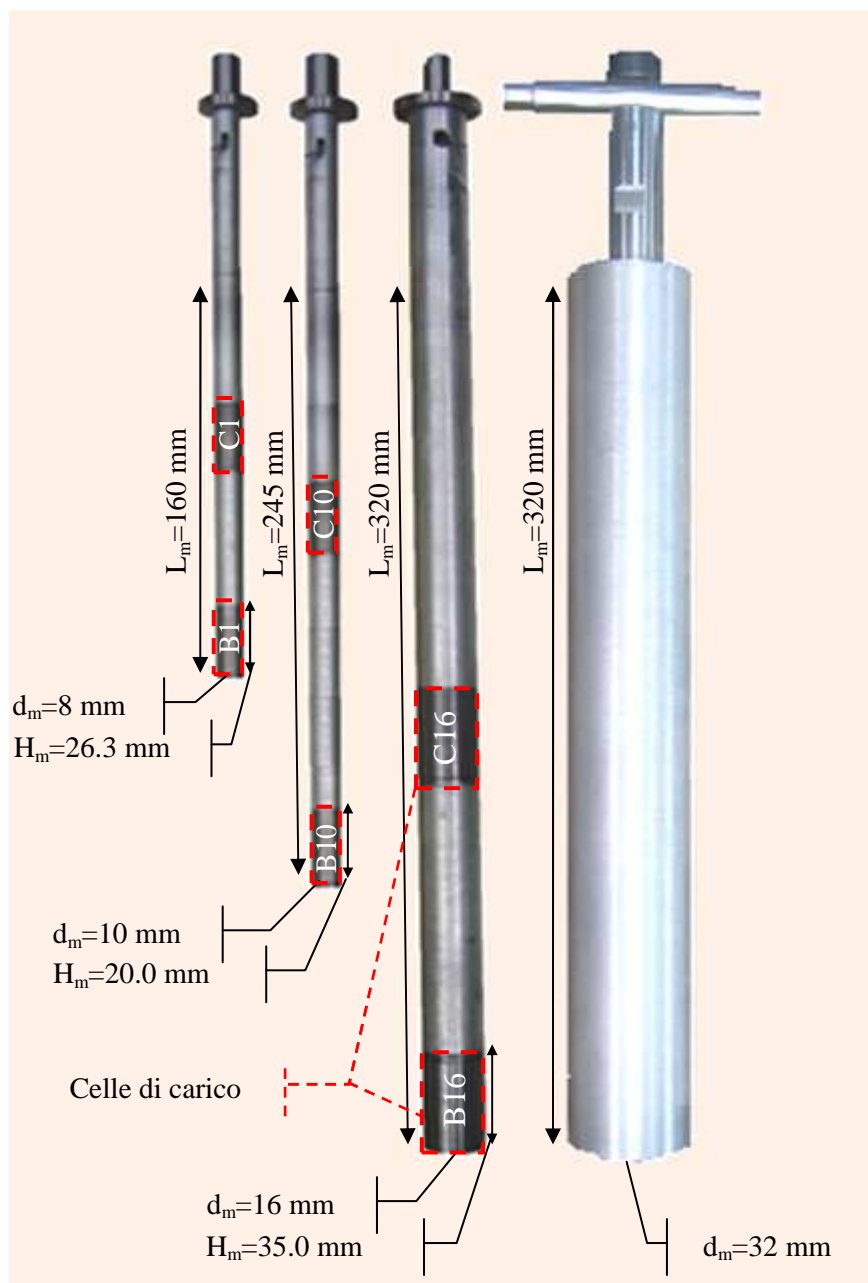
$d_m$  = diametro del palo modello

$L_m$  = lunghezza del palo modello immersa nel terreno

$H_m$  = altezza del manicotto che ricopre la cella di carico miniaturizzata

$R_t$  = rugosità totale della superficie del palo modello

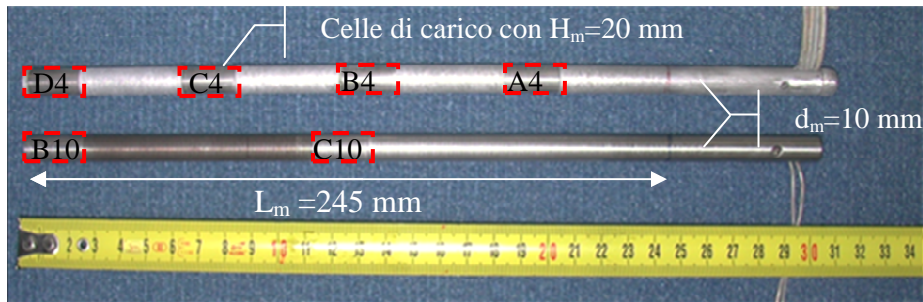
Ogni cella di carico interna (Figg. 1.11a e 1.11b) è strumentata da 8 estensimetri (tipo N2A-13-S063Q-350-Micro Measurements Group, Inc) con una resistenza elettrica di  $350\Omega$ , incollati a coppie sulle quattro facce piane, che compongono la cella, a formare un ponte di Wheastone completo. La lavorazione della cella a facce piane rende trascurabili gli effetti di pre-tensionamento che gli estensimetri avrebbero se la superficie fosse curva; inoltre gli estensimetri sono fissati con una particolare colla acrilica che li rende impermeabili all'acqua. Cavi capillari sono infine utilizzati come sistema di connessione tra la cella di carico e il sistema di acquisizione e sono fatti scorrere internamente al fusto cavo del palo, per proteggerli dal logorio. Ogni cella miniaturizzata è poi esternamente protetta da un manicotto metallico posizionato a copertura degli estensimetri durante la fase di assemblaggio del palo modello (Fig. 1.11a); questo accorgimento permette, oltre a salvaguardare il funzionamento delle cellette di carico, di ripristinare la continuità superficiale del palo da testare.



*Figura 1.10a – Geometria dei pali modello.*

Le celle interne sono poi calibrate singolarmente e in configurazione di prova, cioè già collegate al fusto del palo. In Figura 1.12 è mostrato, a titolo di esempio, un ciclo di carico e scarico delle celle del palo avente diametro 8 mm, già assemblate in configurazione di prova: la

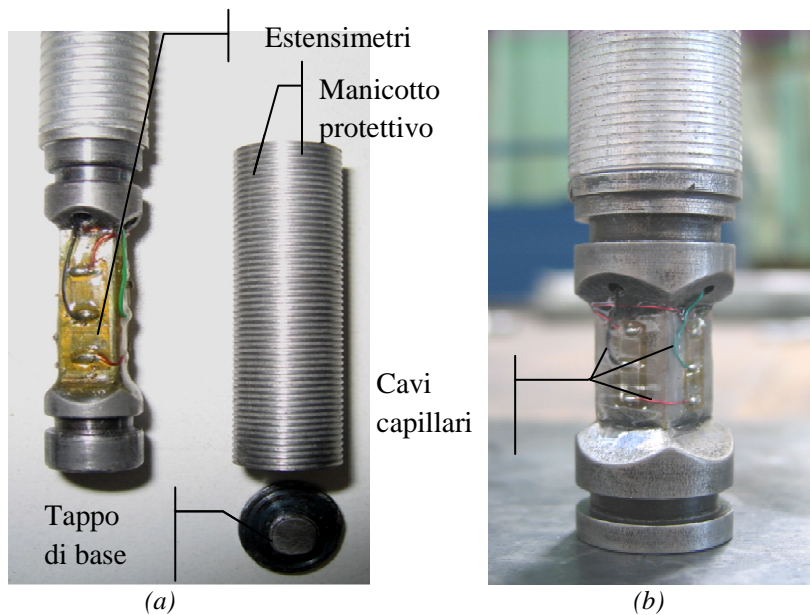
risposta di entrambe le celle ai carichi di compressione appare lineare e senza isteresi.



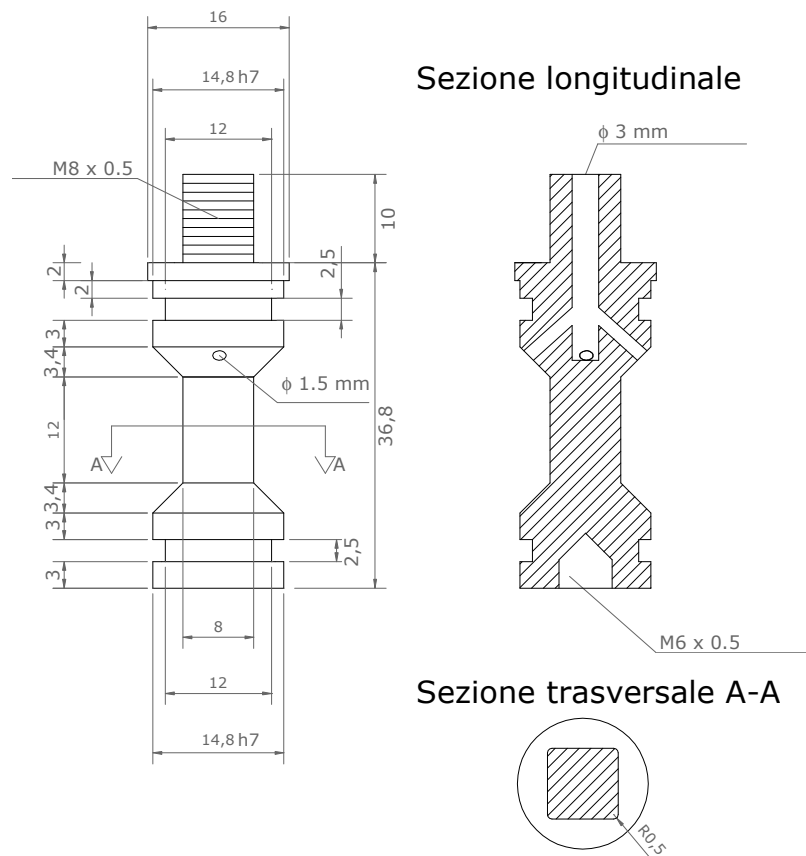
*Figura 1.10b – Pali modello  $d_m=10$  mm con 2 e 4 celle di carico interne.*

Le costanti di calibrazione di ciascuna cella di carico miniaturizzata sono ottenute eseguendo più cicli di carico-scarico e impiegando nei calcoli il valore medio. Inoltre si è assunta una risposta uguale delle celle in trazione e compressione per i pali  $d_m=10$  mm e  $d_m=16$  mm, mentre per il palo  $d_m=8$  mm le costanti sono apparse sperimentalmente differenti portando a distinguerle in funzione della direzione del carico agente.

In Tabella 1.5 sono riassunte le costanti di calibrazione  $K_{comp}$  e  $K_{traz}$  impiegate nell'interpretazione delle prove; per le sigle identificative delle celle di carico si rimanda alle Figure 1.10a e 1.10b.



*-Figura 1.11a – Particolari delle celle di carico di base del palo  $d_m=8$  mm (a) e del palo  $d_m=16$  mm (b).*



-Figura 1.11b– Disegno tecnico della cella di base del palo  $d_m=16$  mm (quote in mm).

| Palo modello | Cella di carico | $K_{comp}$<br>[mV/N] | $K_{traz}$<br>[mV/N] |
|--------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| $d_m=8$ mm   | C1              | 0.336                | 0.345                |
|              | B1              | 0.214                | 0.208                |
| $d_m=10$ mm  | C10             | 0.242                | 0.242                |
|              | B10             | 0.231                | 0.231                |
| $d_m=10$ mm  | A4              | 0.417                | -                    |
|              | B4              | 0.436                | -                    |
|              | C4              | 0.424                | -                    |
|              | D4              | 0.408                | -                    |
| $d_m=16$ mm  | C16             | 0.057                | 0.057                |
|              | B16             | 0.049                | 0.049                |

-Tabella 1.5 – Costanti di calibrazione delle celle interne ai pali modello.



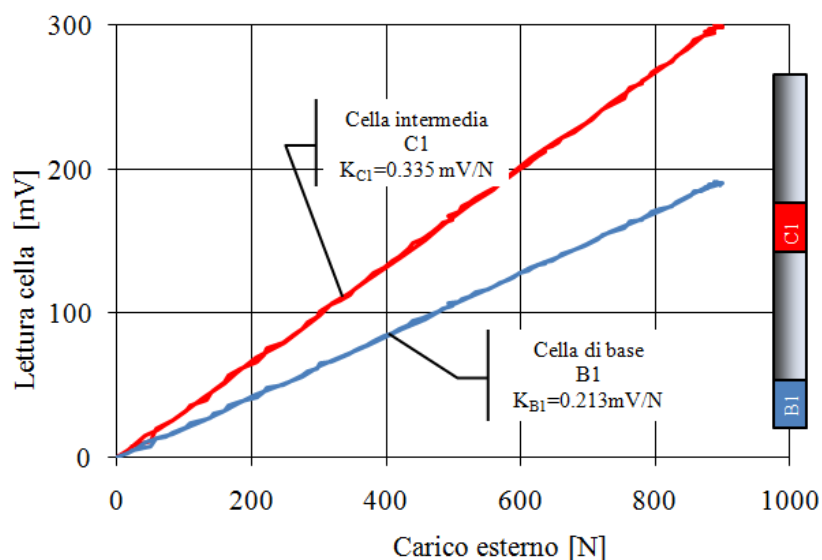
Con:

$C_i$  = cella intermedia al palo

$B_i$  = cella alla base del palo

$K_{comp}$  = costante di calibrazione per carichi di compressione

$K_{traz}$  = costante di calibrazione per carichi di trazione



-Figura 1.12– Ciclo di calibrazione delle celle C1 (intermedia) e B1 (base) del palo  $d_m=8$  mm con le rispettive costanti di calibrazione  $K_{C1}$  e  $K_{B1}$ .

Il fusto cavo dei pali modello e i manicotti protettivi sono lavorati al tornio allo scopo di conferire loro una elevata rugosità in grado di simulare le asperità superficiali dei pali trivellati, realizzati in calcestruzzo gettato in opera. Il corretto esito della lavorazione meccanica è verificato attraverso l'impiego di un apposito strumento, chiamato profilometro o rugosimetro (modello HandySurf E-35A). I risultati (Tab. 1.4), ottenuti dalle misurazioni effettuate in più punti sul fusto del palo, hanno portato a concludere che la lavorazione dei diversi elementi presenta una buona uniformità, con valori di  $R_t \geq 80 \mu\text{m}$  (con  $R_t$  si intende la massima distanza picco-valle, del profilo del fusto del palo, misurata dal rugosimetro su una lunghezza pari a 2.5 mm [Yoshimi e Kishida, 1981a], minima dimensione di indagine imponibile allo strumento); inoltre il profilo si presenta, su ciascun elemento analizzato, prevalentemente periodico nelle diverse sezioni di misura.

La sommità di ciascun palo è filettata per permette di raccordare un elemento a T, per l'aggancio e l'estrazione in prove di trazione, e un

elemento terminante a semisfera per le prove di compressione, riproducente un contatto puntuale palo-piastra di carico.

Il palo di diametro 32 mm, è realizzato interamente in alluminio e presenta una superficie rugosa di caratteristiche comparabili a quelle dei pali più piccoli. Non disponendo di celle di misura interne, è impiegato solamente per prove in trazione.

## **1.6 PREPARAZIONE DEL MODELLO**

Per ricostruire modelli di terreno omogenei, con un grado di addensamento prescelto, si adotta la tecnica di deposizione pluviale in aria della sabbia FF secca [Fretti et al. 1995; Garnier 2001].

In Figura 1.13 si mostra la fase di deposizione della sabbia all'interno del contenitore di prova. Il contenitore cilindrico del modello è in acciaio con diametro interno di 400 mm e altezza variabile con la lunghezza del palo modello. Le pareti di 10 mm di spessore offrono una rigidità elevata, tale da giustificare l'assunzione di una consolidazione del tipo  $k_0$ , a deformazione laterale impedita. L'altezza minima del campione è 440 mm (per  $d_m=8$  mm) mentre la massima è 640 mm (per  $d_m=16$  mm).

La densità relativa  $D_R$  è funzione dell'apertura dell'asola della tramoggia da cui scende la sabbia oltre che dell'altezza di caduta stessa. Nella sperimentazione sono ricostruiti due livelli di addensamento, uno medio, indicato nel seguito come MD, corrispondente a circa il 45-50% di densità relativa e uno alto, definito nel seguito con l'acronimo anglosassone HD, corrispondente a circa 80-85% di densità.

Poiché la ricostruzione avviene a 1g, la densità media del campione dopo la deposizione è inferiore a quella che esso raggiunge alla fine della consolidazione in volo.

La densità relativa  $D_R$  di riferimento della prova è quella media calcolata dopo la consolidazione. All'interno del campione l'indice dei vuoti decresce con la profondità a causa del campo gravitazionale accelerato e l'errore che si commette nello stimare un valore medio di densità, e quindi di indice dei vuoti, per l'intero campione è inferiore al 5%.



-Figura 1.13 – Deposizione pluviale della sabbia FF secca a 1g.

Ogni campione di terreno prevede l'installazione di un solo palo modello.

In particolare i pali studiati sono “*idealmente trivellati*” [Fioravante, 2002], cioè installati senza detensionamento del terreno circostante il fusto. La procedura esecutiva si suddivide in 4 fasi:

1. deposizione pluviale della sabbia FF secca a 1g fino alla quota corrispondente alla base del palo modello;
2. posizionamento del palo modello al centro del contenitore, sospeso a due spallette di sostegno e verifica della sua verticalità;

3. deposizione pluviale della sabbia secca FF a 1g fino al raggiungimento della quota prefissata per il piano campagna;
4. eliminazione dei sostegni del palo modello e livellazione del piano campagna.

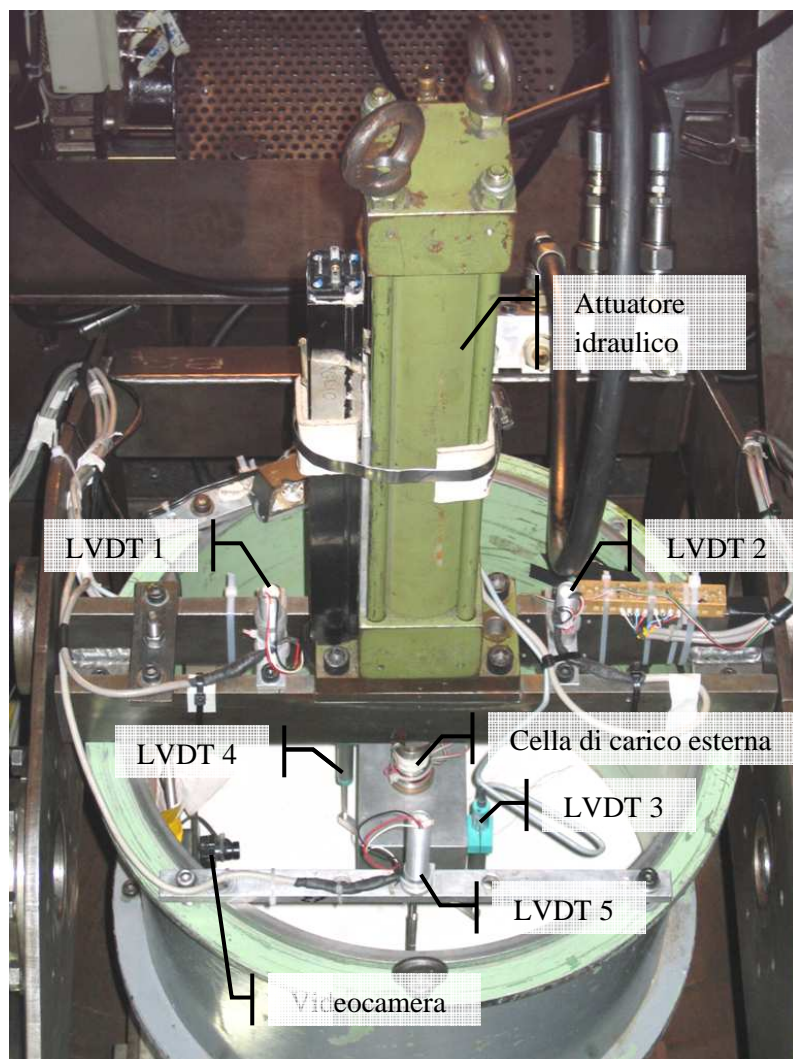
In Figura 1.14 sono raccolte, a titolo di esempio, 3 foto scattate durante le fasi di preparazione di un modello.



*-Figura 1.14 – Fasi realizzative dell'installazione dei pali modello idealmente trivellati.*

Successivamente all'installazione del palo, il modello è completato dal posizionamento di una serie di strumenti di misura necessari per monitorare le successive fasi di prova ed acquisire i dati di interesse.

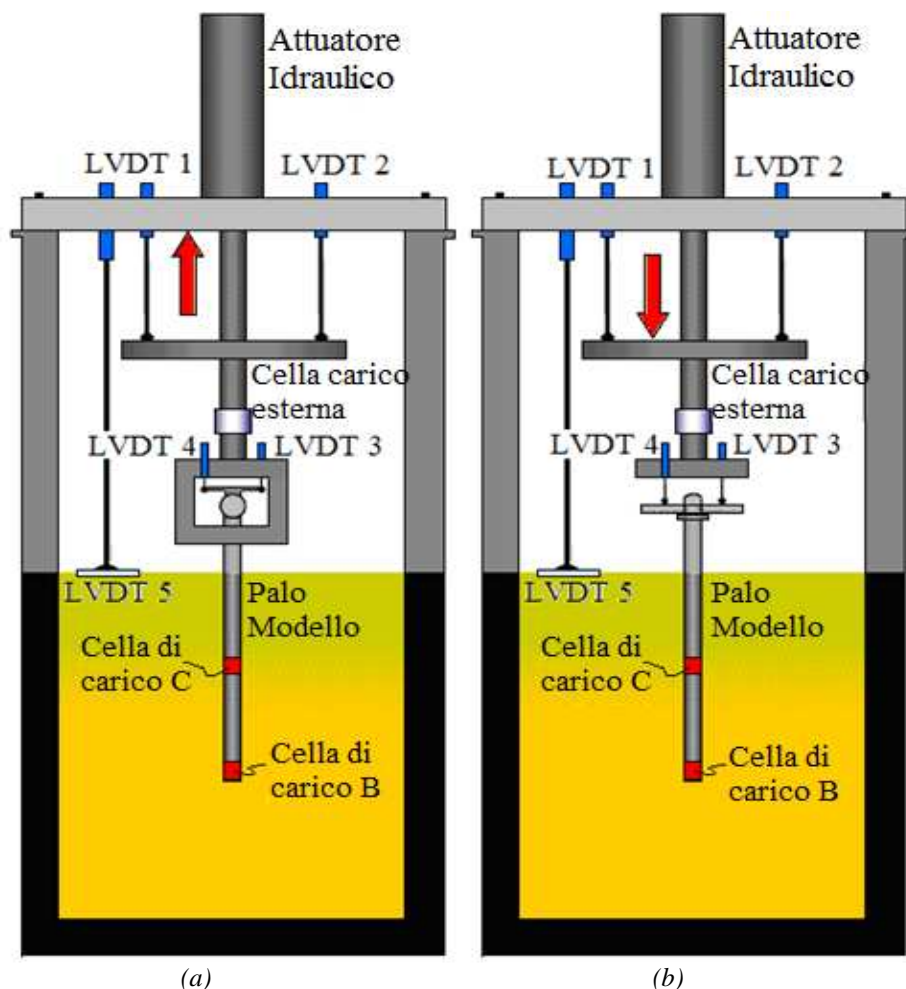
In Figura 1.15 è mostrata una foto del modello strumentato, montato nel cestello basculante della centrifuga, mentre in Figura 1.16 sono riportati gli schemi della configurazione di prova in trazione (Fig. 1.16a) e in compressione (Fig. 1.16b). Quattro LVDT sono posizionati per misurare il cedimento del palo durante la fase di consolidazione e la successiva fase di carico, mentre un LVDT di maggiore lunghezza è posto a circa 40 mm dal bordo del contenitore per misurare i cedimenti del piano campagna durante la fase di consolidazione. Un pistone idraulico (attuatore) è utilizzato per movimentare il palo durante la prova, mentre una cella di carico esterna, solidale all'attuatore, permette di misurare la forza totale applicata nella fase di trazione o compressione.



-Figura 1.15 – Modello strumentato alloggiato nel cestello della centrifuga.

In Figura 1.17 sono mostrati due particolari del sistema di carico usato in prove di trazione (Fig. 1.17a) e di compressione (1.17b). Nel primo caso (Fig. 1.17a) una *scatola a doppia C* metallica a elevata rigidità è utilizzata per agganciare l'elemento a T avvitato alla testa filettata del palo modello e permettere così la fase di estrazione. Due LVDT (LVDT 3 e LVDT 4), solidali alla scatola a doppia C, sono avvitati ad una traversina in alluminio, poggiante sulla testa del palo modello, per misurarne contemporanea in due punti l'abbassamento nella fase di consolidazione. Nella fase di carico lo spostamento del

palo è misurato dagli LVDT 1 e LVDT 2. Nel secondo caso (Fig. 1.17b) una piastra metallica rigida è impiegata per bloccare gli LVDT 3 e LVDT 4 necessari per quantificare il cedimento del palo durante la consolidazione. Un elemento a traversina è calzato sulla testa del palo e usato come piano di misura.



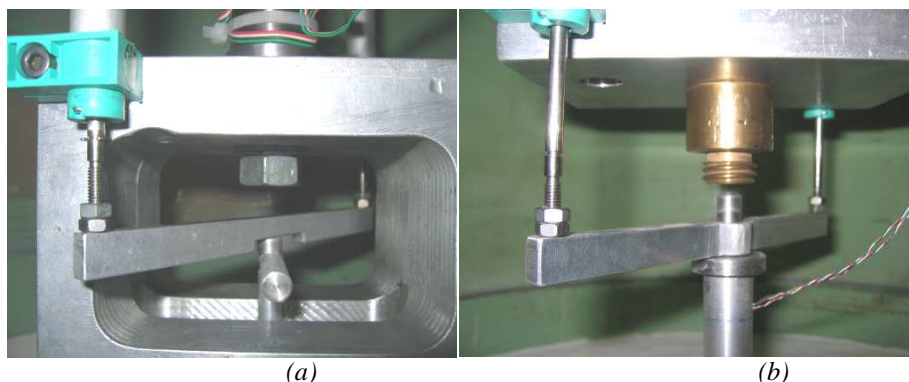
(a) (b)  
-Figura 1.16- Schemi delle configurazioni di prova in trazione (a) e in compressione (b).

Tra la base del palo e quella del contenitore sono garantiti sempre  $20d_m$  di distanza al fine di evitare eventuali effetti bordo che potessero insorgere, specie nelle prove di compressione. Dai riferimenti di letteratura tale prescrizione risulta largamente a favore di sicurezza. Per minimizzare gli effetti di interazione, Bolton et al. [1999] prescrivono che il rapporto tra la distanza dell'asse palo da un qualunque confine



rigido (fondo o parete laterale) e il diametro del palo modello stesso sia maggiore o uguale di  $10d_m$ . Craig e Sabagh [1994] utilizzando i risultati di prove in centrifuga su pali infissi in sabbia densa caricati assialmente, hanno osservato che una distanza compresa tra  $5d_m$  e  $8d_m$ , tra fondo del contenitore e punta del palo, è sufficiente a non risentire di effetti bordo, con valori maggiori per bassi stati tensionali. Yang [2006] ha condotto uno studio analitico-parametrico su pali caricati assialmente in compressione ed installati in sabbia pulita o limosa con indice di plasticità del 10-15%. Ipotizzando un tipo di rottura localizzato attorno alla base, di sviluppo simile all'espansione di una cavità sferica, ha concluso che la zona che influenza la capacità portante del palo, installato in un deposito omogeneo di sabbia pulita, si estende sotto la sua base per un'altezza compresa tra 3 e 5 diametri, con valori maggiori per pali corti. Il risultato si mostra concorde a quanto osservato sperimentalmente da Craig e Sabagh [1994].

Per i pali modello impiegati nella sperimentazione, aventi diametro 8 mm, 10 mm e 16 mm, le precedenti indicazioni dimensionali risultano sempre garantite. Per il palo  $d_m = 32$  mm, si osserva che la distanza dalle pareti del contenitore è di  $6.25d_m$ . I dati ottenuti dalla sperimentazione non sembrano presentare portate laterali maggiorate da questo fenomeno: i valori delle tensioni tangenziali calcolati sono simili a quelli del palo da 16 mm di diametro avente le stesse lunghezze prototipo. Inoltre, essendo stato sottoposto a sole prove di trazione, la distanza al di sotto della base del palo  $d_m = 32$  mm è fissata a  $10d_m$  in quanto le restrizioni per il montaggio in centrifuga non consentivano di aumentare ulteriormente tale dimensione.



-Figura 1.17 – Particolari della testa del palo e del sistema di carico (a) in trazione e (b) compressione.

## 1.7 ESECUZIONE DELLA PROVA DI CARICO

Concluso l'allestimento del modello e il suo posizionamento sul cestello basculante della centrifuga, l'esecuzione della prova si divide principalmente in 3 fasi: consolidazione, avvicinamento e ciclo di carico. In alcuni casi sono condotti più cicli di carico successivi.

La fase di consolidazione è eseguita aumentando la velocità di rotazione della centrifuga fino a raggiungere il livello di accelerazione prescelto per la prova, che è fissato al piano campagna del modello. A causa del diverso peso specifico, la sabbia manifesta dei cedimenti disuguali da quelli del palo: questi cedimenti differenziali producono delle *tensioni residue*, sia lungo il fusto del palo stesso che alla sua base [Balachowski 1995; Maiorano et al. 1996; Rezende et al. 1998; Garnier 2001; Colombi 2005; Fioravante et al. 2006]. Le tensioni residue generate durante la consolidazione in volo hanno entità non trascurabile nei modelli in scala ridotta, in cui il palo è installato a 1g, e devono essere tenute in conto nella fase di interpretazione dei risultati della prova di carico, per non incorrere in errori grossolani.

Nella seconda fase è avvicinato al palo il sistema di carico, che durante la consolidazione si trova distante per non modificarne il regime di spostamenti.

L'ultima fase, quella di carico vera e propria, ha inizio quando vi è il contatto con il palo: l'attuatore idraulico movimenta la piastra, in prove di compressione, o la doppia C, in prove di trazione, imponendo una velocità costante di 0.007 mm/s.

La prova è considerata conclusa quando il palo ha subito uno spostamento  $w$  circa pari al suo diametro ( $w/d_m=100\%$ ). Successivamente esso è scaricato ed eventualmente caricato una seconda volta (fino a  $w/d_m=200\%$ ). Durante la terza fase sono acquisiti i valori del cedimento del palo e dei carichi, letti dalla cella esterna e da quelle interne, se presenti.

Nelle Tabelle 1.6a e 1.6b sono sintetizzati i dati relativi alle prove in centrifuga eseguite e di seguito analizzate: in esse si richiama il nome della prova, la geometria del palo modello ( $d_m$ = diametro;  $L_m$ = lunghezza della parte in sabbia) e dell'equivalente in scala prototipo ( $D_p$ = diametro;  $L_p$ = lunghezza), il grado di addensamento del campione a fine consolidazione  $D_R$ , il livello di accelerazione imposto a piano campagna,  $a/g$ , e il numero delle celle interne di misura. In particolare in Tabella 1.6a è riportato l'elenco delle 21 prove soggette a carichi di compressione mentre in Tabella 1.6b quello delle 36 prove sottoposte a carichi di trazione.



| Nome prova   | Modello       |               | $D_R$ | a/g | Prototipo    |              | N°<br>celle<br>interne |
|--------------|---------------|---------------|-------|-----|--------------|--------------|------------------------|
|              | $d_m$<br>[mm] | $L_m$<br>[mm] | [%]   | [-] | $D_p$<br>[m] | $L_p$<br>[m] |                        |
| SPC_8_MD_30  | 8             | 160           | 50.3  | 30  | 0.24         | 4.8          | 2                      |
| SPC_8_MD_60  | 8             | 160           | 52.7  | 60  | 0.48         | 9.6          | 2                      |
| SPC_8_MD_120 | 8             | 160           | 55.2  | 120 | 0.96         | 19.2         | 2                      |
| SPC_8_MD_160 | 8             | 160           | 57.9  | 160 | 1.28         | 25.6         | 2                      |
| SPC_8_HD_30  | 8             | 160           | 81.5  | 30  | 0.24         | 4.8          | 2                      |
| SPC_8_HD_60  | 8             | 160           | 82.5  | 60  | 0.48         | 9.6          | 2                      |
| SPC_8_HD_120 | 8             | 160           | 82.8  | 120 | 0.96         | 19.2         | 2                      |
| SPC_8_HD_160 | 8             | 160           | 83.2  | 160 | 1.28         | 25.6         | 2                      |
| PT3a_FF1     | 10            | 245           | 56.2  | 30  | 0.30         | 7.4          | 4                      |
| PT3a_FF7     | 10            | 245           | 43.5  | 30  | 0.30         | 7.4          | 4                      |
| PT3a_FF8     | 10            | 245           | 45.9  | 80  | 0.80         | 19.6         | 4                      |
| PT3a_FF2     | 10            | 245           | 41.7  | 80  | 0.80         | 19.6         | 4                      |
| PT1_FF28     | 10            | 245           | 50.9  | 80  | 0.80         | 19.6         | 4                      |
| PT3a_FF6     | 10            | 245           | 45.8  | 130 | 1.30         | 31.9         | 4                      |
| PT3a_FF9     | 10            | 245           | 85.1  | 30  | 0.30         | 7.4          | 4                      |
| PT3a_FF3     | 10            | 245           | 82.3  | 80  | 0.80         | 19.6         | 4                      |
| PT3a_FF5     | 10            | 245           | 83.7  | 130 | 1.30         | 31.9         | 4                      |
| SPC_16_MD_30 | 16            | 320           | 51.9  | 30  | 0.48         | 9.6          | 2                      |
| SPC_16_MD_80 | 16            | 320           | 57.4  | 80  | 1.28         | 25.6         | 2                      |
| SPC_16_HD_30 | 16            | 320           | 80.3  | 30  | 0.48         | 9.6          | 2                      |
| SPC_16_HD_80 | 16            | 320           | 83.2  | 80  | 1.28         | 25.6         | 2                      |

*-Tabella 1.6a – Quadro riassuntivo delle prove di carico in compressione oggetto di indagine.*

| Nome prova   | Modello       |               | $D_R$ | a/g | Prototipo    |              | N°<br>celle<br>interne |
|--------------|---------------|---------------|-------|-----|--------------|--------------|------------------------|
|              | $d_m$<br>[mm] | $L_m$<br>[mm] | [%]   | [-] | $D_p$<br>[m] | $L_p$<br>[m] |                        |
| SPT_8_MD_30  | 8             | 160           | 55.1  | 30  | 0.24         | 4.8          | 2                      |
| SPT_8_MD_60  | 8             | 160           | 55.3  | 60  | 0.48         | 9.6          | 2                      |
| SPT_8_MD_120 | 8             | 160           | 57.5  | 120 | 0.96         | 19.2         | 2                      |
| SPT_8_MD_160 | 8             | 160           | 57.2  | 160 | 1.28         | 25.6         | 2                      |
| SPT_8_HD_30  | 8             | 160           | 82.6  | 30  | 0.24         | 4.8          | 2                      |
| SPT_8_HD_60  | 8             | 160           | 83.0  | 60  | 0.48         | 9.6          | 2                      |
| SPT_8_HD_120 | 8             | 160           | 84.3  | 120 | 0.96         | 19.2         | 2                      |
| SPT_8_HD_160 | 8             | 160           | 86.7  | 160 | 1.28         | 25.6         | 2                      |
| PT1_FF32     | 10            | 245           | 43.3  | 30  | 0.30         | 7.4          | 2                      |
| PT1_FF38     | 10            | 245           | 50.5  | 80  | 0.80         | 19.6         | 2                      |
| PT1_FF31     | 10            | 245           | 55.0  | 130 | 1.30         | 31.9         | 2                      |
| PT1_FF45     | 10            | 245           | 43.3  | 30  | 0.30         | 7.4          | 2                      |
| PT1_FF44     | 10            | 245           | 46.3  | 80  | 0.80         | 19.6         | 2                      |
| PT1_FF43     | 10            | 245           | 44.8  | 130 | 1.30         | 31.9         | 2                      |
| PT1_FF29     | 10            | 245           | 76.4  | 30  | 0.30         | 7.4          | 2                      |
| PT1_FF33     | 10            | 245           | 83.0  | 80  | 0.80         | 19.6         | 2                      |
| PT1_FF30     | 10            | 245           | 85.9  | 130 | 1.30         | 31.9         | 2                      |
| PT1_FF47     | 10            | 245           | 76.1  | 30  | 0.30         | 7.4          | 2                      |
| PT1_FF42     | 10            | 245           | 75.9  | 80  | 0.80         | 19.6         | 2                      |
| PT1_FF46     | 10            | 245           | 75.1  | 130 | 1.30         | 31.9         | 2                      |
| SPT_16_MD_30 | 16            | 320           | 54.7  | 30  | 0.48         | 9.6          | 2                      |
| SPT_16_MD_80 | 16            | 320           | 58.5  | 80  | 1.28         | 25.6         | 2                      |
| SPT_16_HD_30 | 16            | 320           | 81.5  | 30  | 0.48         | 9.6          | 2                      |
| SPT_16_HD_80 | 16            | 320           | 83.5  | 80  | 1.28         | 25.6         | 2                      |
| PULL 1       | 32            | 320           | 44.4  | 30  | 0.96         | 9.6          | 0                      |
| PULL 2       | 32            | 320           | 45.5  | 80  | 2.56         | 25.6         | 0                      |
| PULL 3       | 32            | 320           | 50.0  | 130 | 4.16         | 41.6         | 0                      |
| PULL 8       | 32            | 320           | 45.9  | 30  | 0.96         | 9.6          | 0                      |
| PULL 9       | 32            | 320           | 51.3  | 80  | 2.56         | 25.6         | 0                      |
| PULL 4       | 32            | 320           | 81.4  | 130 | 4.16         | 41.6         | 0                      |
| PULL 5       | 32            | 320           | 84.3  | 80  | 2.56         | 25.6         | 0                      |
| PULL 6       | 32            | 320           | 83.9  | 30  | 0.96         | 9.6          | 0                      |
| PULL 7       | 32            | 320           | 84.5  | 30  | 0.96         | 9.6          | 0                      |
| PULL 10      | 32            | 320           | 84.0  | 80  | 2.56         | 25.6         | 0                      |
| PULL 11      | 32            | 320           | 85.0  | 130 | 4.16         | 41.6         | 0                      |
| PULL 12      | 32            | 320           | 84.6  | 30  | 0.96         | 9.6          | 0                      |

*-Tabella 1.6b – Quadro riassuntivo delle prove di carico in trazione oggetto di indagine.*

## **CAPITOLO 2**

---

### ***INTERPRETAZIONE DELLE PROVE DI CARICO IN CENTRIFUGA***

---

#### **2.1 INTRODUZIONE**

Nel capitolo sono descritti il metodo utilizzato per interpretare le misure derivate dalla sperimentazione in centrifuga geotecnica e le considerazioni generali sui risultati ottenuti.

Il principale scopo dello studio svolto è di chiarire i fenomeni fisici che governano i meccanismi di trasferimento della forza esterna tra il palo rugoso isolato, caricato assialmente, e il terreno granulare circostante. Particolare attenzione è rivolta all'analisi della mobilitazione dell'attrito laterale che si sviluppa nella zona di interfaccia palo-terreno.

Un totale di 56 prove di carico (Tabb. 1.17a e 1.17b) sono condotte su pali idealmente trivellati, installati in sabbia FF secca, deposta a due densità relative ( $MD=45-50\%$  e  $HD=75-80\%$ ), e caricati assialmente in compressione e in trazione. Ciascun modello è testato ad un prefissato livello di accelerazione. I campi di accelerazione sperimentati variano da  $30g$  fino a  $160g$  permettendo di simulare una vasta gamma di prototipi, con diametri  $D_p$  da  $0.24$  m a  $4.16$  m e lunghezze  $L_p$  comprese tra  $4.8$  m e  $41.6$  m.

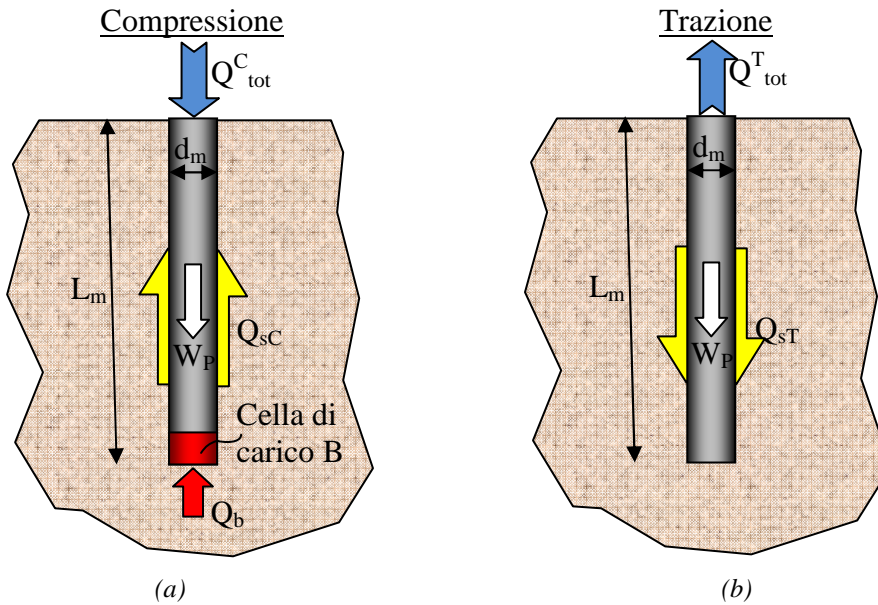
I risultati delle prove di carico sono elaborati ed interpretati allo scopo di analizzare come le diverse condizioni al contorno modifichino la mobilitazione delle tensioni tangenziali e della portata di base (Cap. 5) dei pali modello idealmente trivellati in sabbia.

#### **2.2 CONDIZIONE DI EQUILIBRIO DEL PALO CARICATO**

In una prova di compressione, il carico assiale applicato alla testa del palo  $Q_{tot}^C$  è equilibrato da una portata laterale media  $Q_{sC}$ , che si sviluppa

lungo il fusto, e una portata di base  $Q_b$  (Figg. 2.1a), mobilitate a fronte di un certo cedimento  $w$ .

In una prova di trazione il carico di sfilamento  $Q_{\text{tot}}^T$  è equilibrato dalla sola portata laterale  $Q_{sT}$ , che si mobilita a fronte di un certo sfilamento  $w$  (Fig. 2.1b).



-Figura 2.1 – Condizione di equilibrio per un palo caricato assialmente in compressione (a) e in trazione (b).

Dalla Figura 2.1a si ricava la condizione di equilibrio totale per un palo strumentato di peso proprio accelerato  $W_P$  caricato assialmente in compressione da  $Q_{\text{tot}}^C$ , data da:

$$Q_{\text{tot}}^C + W_P = Q_b + Q_{sC} \quad [F] \quad (2.1)$$

Poiché il palo è strumentato alla base, la lettura della cella B restituisce il valore della portata di base  $Q_b$ . La tensione unitaria di base  $q_b$  è calcolata come:

$$q_b = Q_b / A_b \quad [FL^{-2}] \quad (2.2)$$

Con:

$$A_b = \text{area di base del palo} = (\pi d_m^2) / 4 \quad [L^2] \quad (2.3)$$

$d_m$  = diametro nominale del palo modello

Dalla (2.1) si ricava la portata laterale media che si sviluppa sul palo:

$$Q_{sC} = Q_{\text{tot}}^C + W_P - Q_b \quad [F] \quad (2.4)$$

Normalizzando  $Q_{sC}$  per l'area laterale nominale del palo  $A_{sn}$  si ottiene il valore della tensione tangenziale media  $\tau_{sC}$  agente sul fusto:

$$\tau_{sC} = Q_{sC}/A_{sn} \quad [FL^{-2}] \quad (2.5)$$

Con:

$$A_{sn} = \pi d_m L_0 \quad [L^2] \quad (2.6)$$

$L_0 = L_m \pm w$ ; lunghezza del palo modello immersa in sabbia al netto dello spostamento  $w$

Dalla Figura 2.1b si ricava la condizione di equilibrio totale per un palo di peso proprio  $W_P$  sottoposto a trazione assiale da  $Q_{tot}^T$ , data da:

$$Q_{tot}^T - W_P = Q_{sT} \quad [F] \quad (2.7)$$

Normalizzando  $Q_{sT}$  per l'area laterale nominale del palo  $A_{sn}$  (2.6) si ottiene il valore della tensione tangenziale media  $\tau_{sT}$  agente sul fusto, con la formulazione:

$$\tau_{sT} = Q_{sT}/A_{sn} \quad [FL^{-2}] \quad (2.8)$$

Per i pali modello strumentati in più sezioni è possibile ottenere una stima della portata laterale media che agisce su ciascun concio, ovvero su ciascun segmento compreso tra due successive celle di misura, come schematizzato in Figura 2.2a, per un palo soggetto a compressione, e Figura 2.2b, per uno sottoposto a trazione.

Con riferimento alla Figura 2.2a, si stima la portata laterale media,  $Q_{sCi}$ , che localmente agisce sul concio  $i$ -esimo del palo modello soggetto a carico assiale di compressione, come:

$$\text{CONCIO } i\text{-esimo:} \quad Q_{sCi} = Q_{i-1} + W_{Pi} - Q_i \quad [F] \quad (2.9)$$

Analogamente, dalla Figura 2.2b, si ricava che la portata laterale media,  $Q_{sTi}$ , che localmente agisce sul concio  $i$ -esimo del palo modello sottoposto ad un carico assiale di trazione, è data da:

$$\text{CONCIO } i\text{-esimo:} \quad Q_{sTi} = Q_{i-1} - W_{Pi} - Q_i \quad [F] \quad (2.10)$$

Con:

$W_{Pi}$  = peso proprio accelerato del concio  $i$ -esimo

$Q_{i-1}$  = lettura della cella  $i-1$

$Q_i$  = lettura della cella  $i$

Note le portate laterali  $Q_{sCi}$  (2.9) e  $Q_{sTi}$  (2.10), è possibile calcolare la tensione tangenziale media,  $\tau_{sCi}$  per la prova in compressione e  $\tau_{sTi}$  per quella in trazione, che agisce localmente sul concio  $i$ -esimo:

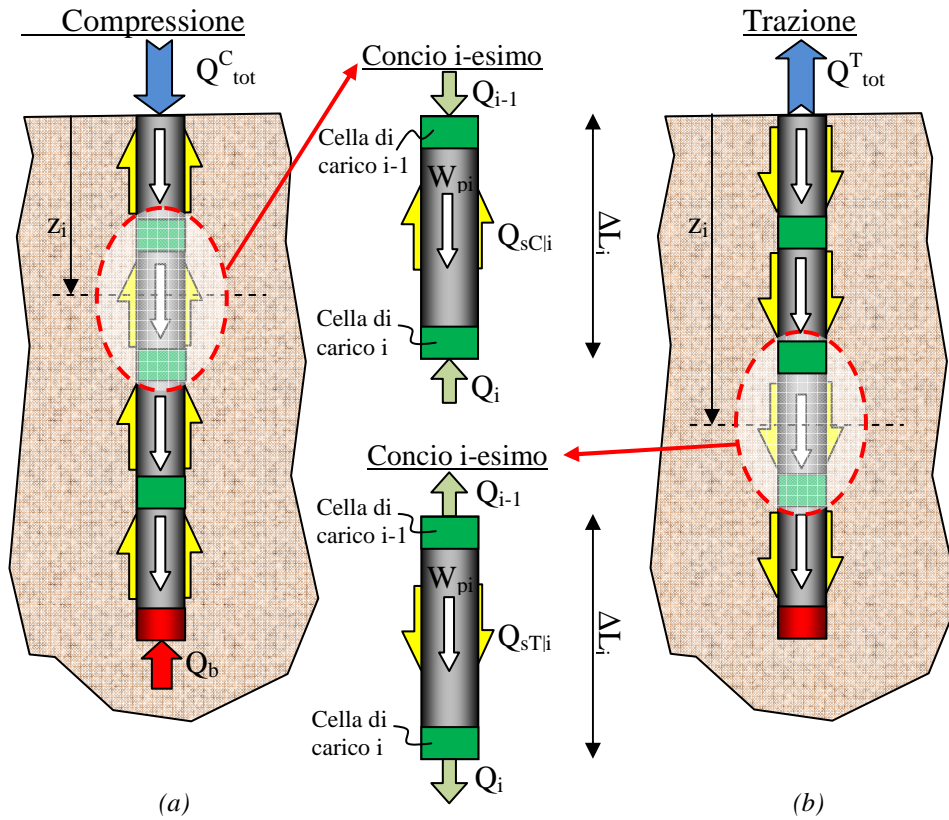
$$\tau_{sC|i} = Q_{sC|i} / A_{sni} \quad [FL^{-2}] \quad (2.11a)$$

$$\tau_{sT|i} = Q_{sT|i} / A_{sni} \quad [FL^{-2}] \quad (2.11b)$$

Con:

$$A_{sni} = \pi d_m \Delta L_i \quad [L^2] \quad (2.12)$$

= area laterale nominale del concio i-esimo con  $\Delta L_i$  stimata al netto di  $w$



-Figura 2.2 – Condizione di equilibrio locale per un palo caricato assialmente in compressione (a) e in trazione (b).

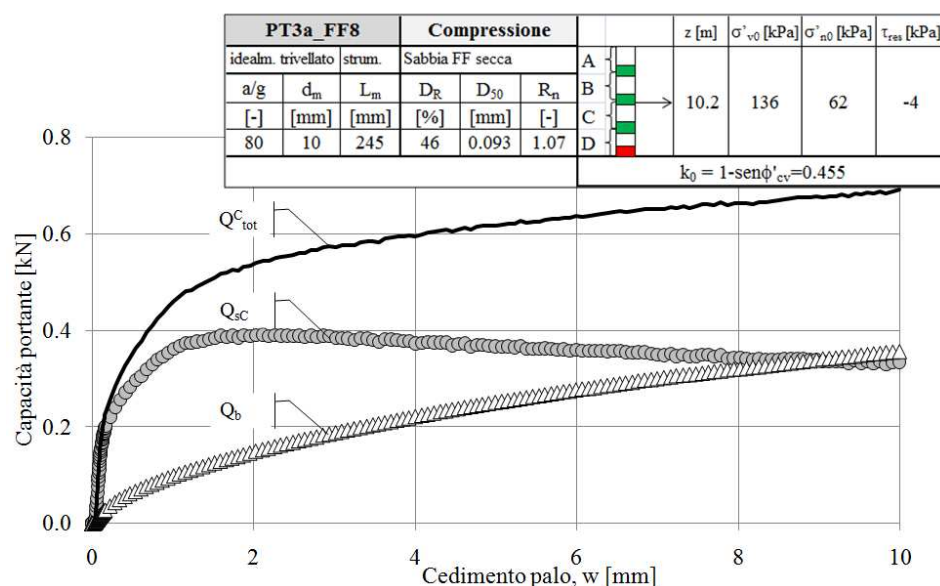
A titolo di esempio, si mostrano in Figura 2.3a le curve della capacità portante totale,  $Q^C_{tot}$ , laterale,  $Q_{sC}$ , e di base,  $Q_b$ , del palo modello  $d_m=10$  mm ottenute da una prova di carico in compressione (PT3a\_FF8) con campione ricostruito a MD ed accelerato a 80 g. E' possibile osservare che mentre la portata di base aumenta progressivamente con il cedimento, quella laterale raggiunge un picco per poi ridursi: questi andamenti, tipici dei pali trivellati, evidenziano l'importanza di valutare la portata di base  $Q_b$  mobilitata in corrispondenza del cedimento di servizio.

In Figura 2.3b, la portata laterale media  $Q_{sC}$  è suddivisa nelle sue componenti locali,  $Q_{sC|i}$  agenti sui 4 conci.

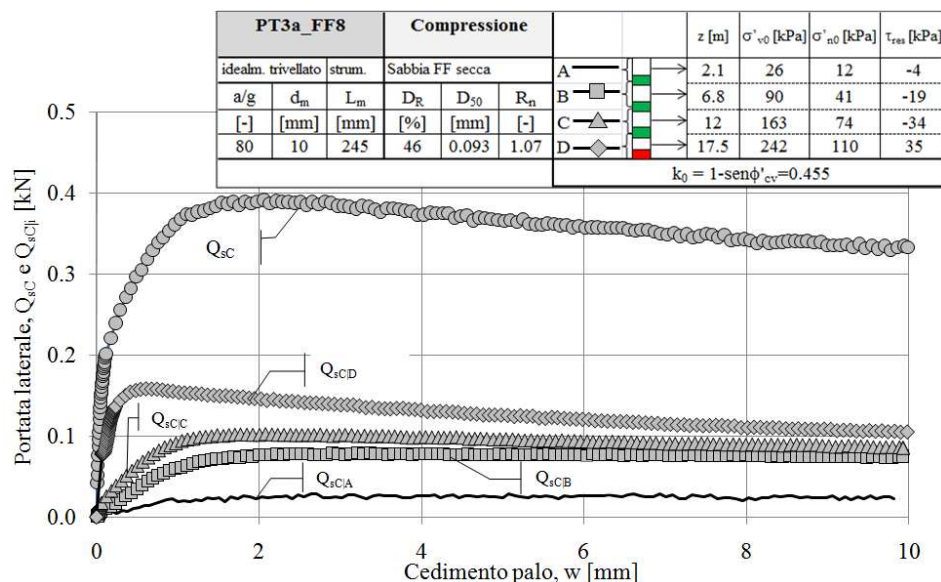
Ogni grafico, rappresentato sempre in scala modello, è accompagnato da un cartiglio che riassume le informazioni sulla prova analizzata:

- nome della prova
- direzione del carico assiale agente: compressione o trazione
- indicazione sul metodo di installazione e sulla presenza o meno di celle di carico interne: strumentato o non strumentato
- sabbia di prova
- livello di accelerazione di prova riferito al piano campagna del modello,  $a/g$
- geometria del palo modello: diametro  $d_m$  e lunghezza in sabbia  $L_m$
- densità relativa del modello a fine consolidazione,  $D_R$
- diametro medio delle particelle di sabbia,  $D_{50}$
- rugosità normalizzata,  $R_n$ .

Nella parte finale del cartiglio sono riportati i valori delle tensioni verticali ed orizzontali efficaci medi su tutta la lunghezza del palo o medi in corrispondenza di ciascun concio, indicando la profondità  $z$  di riferimento e il valore di  $k_0$  assunto nei calcoli di  $\sigma'_{n0}$ .

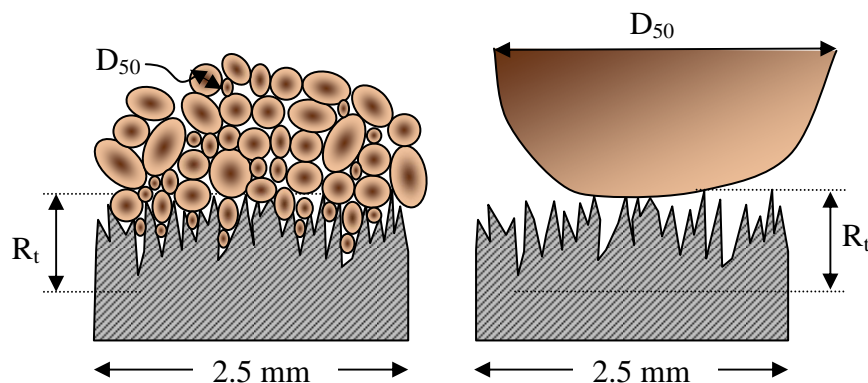


-Figura 2.3a – Curve di capacità portante per la prova di carico a MD in compressione PT3a\_FF8 (scala modello).



-Figura 2.3b– Curve di capacità portante media e locali per la prova di carico a MD in compressione PT3a\_FF8 (scala modello)

Come illustrato al Capitolo 1, i pali utilizzati nella sperimentazione presentano una elevata rugosità superficiale, conferita dalla lavorazione meccanica al tornio: i valori di  $R_t$ , *rugosità superficiale totale* (Fig. 2.4), misurati dal rugosimetro sono risultati compresi tra 80 e 130  $\mu\text{m}$ . Tale valore acquisisce maggiore significato fisico se rapportato alla dimensione media  $D_{50}$  delle particelle di sabbia, definendo così un nuovo parametro chiamato *rugosità normalizzata*  $R_n$  [Uesugi e Kishida 1986], come schematizzato in Figura 2.4. Questi ricercatori hanno evidenziato la dipendenza dell'attrito laterale da  $R_n$  che è risultato un parametro in grado di rappresentare "l'ingranamento" tra il terreno sabbioso e la superficie dell'inclusione.



-Figura 2.4– Definizione della rugosità totale  $R_t$  e della rugosità normalizzata  $R_n$



I pali modello impiegati nella presente sperimentazione hanno valori di  $R_n$  compresi tra 0.86 e 1.4 (Tab. 2.1) e possono essere ritenuti ad alta rugosità, in base ai riferimenti bibliografici e alle considerazioni argomentate nel Capitolo 3, nel quale la dipendenza del comportamento attrittivo da  $R_n$  è stata studiata con particolare riferimento alla sabbia FF.

| $d_m$<br>[mm] | $L_m$<br>[mm] | $L_m/d_m$<br>[-] | $R_t$<br>[ $\mu m$ ] | $R_n$<br>[-] |
|---------------|---------------|------------------|----------------------|--------------|
| 8             | 160           | 20               | 130                  | 1.40         |
| 10            | 245           | 24.5             | 100                  | 1.07         |
| 16            | 320           | 20               | 125                  | 1.34         |
| 32            | 320           | 10               | 80                   | 0.86         |

-Tabella 2.1 –  $R_n$  dei pali modello installati in sabbia FF ( $D_{50}=0.093$  mm).

Per pali o, più in generale, per le superfici ad elevata rugosità normalizzata, alcuni autori [Boulon 1988; Garnier e König 1998; Balachowski 2006] suggeriscono di tenere in considerazione la formazione di una banda di terreno all'interfaccia (banda di taglio) che, a causa dell'ingranamento con il palo rugoso, rimane ad esso solidale durante lo scorrimento. Lo spessore di questa zona varia nel corso della prova [Scarpelli e Wood 1982; Desrues 1991; Alshibli e Hasan 2008] e dipende, oltre che dallo scorrimento imposto e dallo stato tensionale, dalla densità relativa e dalla  $R_t$  superficiale: dai riscontri di letteratura, per pali modello rugosi sembra lecito assumere uno spessore medio della banda di taglio pari a circa  $10D_{50}$  [Roscoe 1970; Wernick 1978; Bridgwater 1980; Scarpelli e Wood 1982; Boulon e Foray 1986; Mühlhaus e Vardoulakis 1987; Foray et al. 1998; Garnier e König 1998; Oda e Iwashita 2000; Balachowski 2006; Alshibli e Hasan 2008]. Inoltre, Garnier e König [1998] suggeriscono di supporre il passaggio della superficie di scorrimento all'interno della banda di taglio in posizione mediana (Fig.2.5).

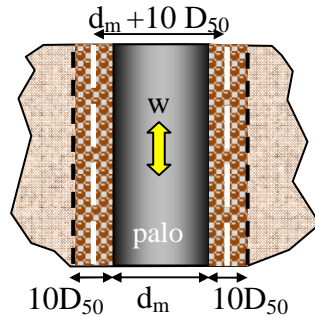
L'effetto della formazione di una banda di taglio solidale al fusto, significativo nella modellazione fisica, riveste minore importanza nella valutazione delle tensioni laterali dei pali in vera grandezza per i quali il contributo maggiorativo di  $10D_{50}$ , con cui incrementare il diametro nominale, è trascurabile [Scarpelli e Wood 1982; Boulon 1988; Sartoris et al. 1998; Balachowski 2006].

Tenendo conto della elevata rugosità superficiale dei pali modello impiegati nella sperimentazione, nel calcolo delle tensioni tangenziali è sostituita  $A_{sn}$  con una superficie laterale maggiorata,  $A_s$ , calcolata

incrementando il diametro nominale  $d_m$  di una quantità pari allo spessore della banda di taglio:

$$A_s = \pi(d_m + 10D_{50})L_0 \quad [L^2] \quad (2.13)$$

Nell'interpretazione delle prove di carico di seguito riportate, lo spessore della banda di taglio è assunto costante, pari al valore medio di  $10D_{50}$ , a media ed alta densità.



-Figura 2.5– Ipotesi di spessore della banda di taglio e dimensione maggiorata del diametro del palo modello [Garnier e König, 1998].

### 2.3 TENSIONI RESIDUE LATERALI E DI BASE

I pali modello idealmente trivellati sono installati nel campione sabbioso a 1g e successivamente montati sul cestello basculante della centrifuga.

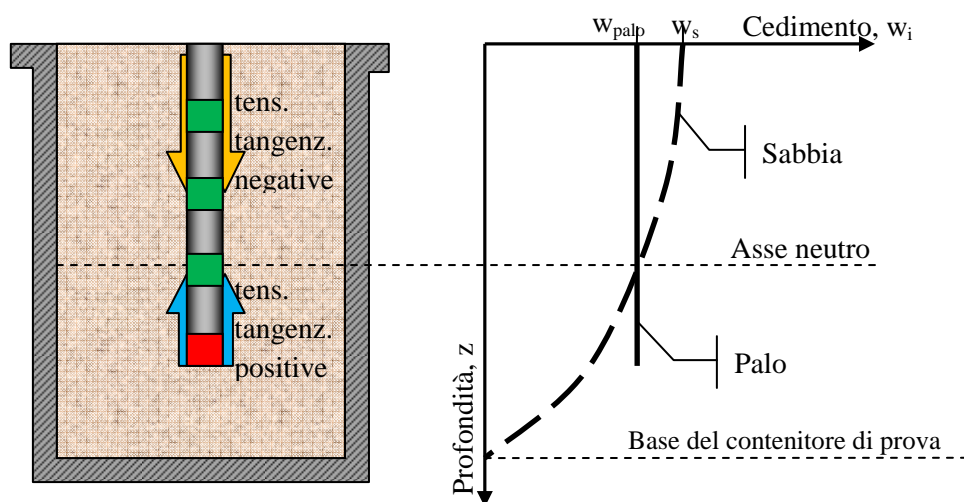
Durante la fase di accelerazione in volo, per raggiungere il livello  $a/g$  previsto, il palo e la sabbia manifestano dei cedimenti differenti a causa della diversità dei pesi propri. I cedimenti della sabbia, misurati a piano campagna sono generalmente maggiori di quelli del palo modello probabilmente per la parziale mobilitazione della sua capacità portante. Essi dipendono dal grado di addensamento iniziale del campione e dal livello di accelerazione raggiunto dalla prova e si stabilizzano quando questo si mantiene costante.

Se si ipotizza che il palo si comporti come un corpo rigido, il suo cedimento può essere assunto costante con la profondità; il cedimento del deposito sabbioso, al contrario, varia in modo non lineare da un valore massimo, misurato a piano campagna, fino ad annullarsi in corrispondenza del fondo del contenitore di prova (Fig. 2.6).

Come mostrato in Figura 2.6, il fusto del palo può essere diviso in due parti: una parte superiore, in cui il cedimento della sabbia è maggiore di quello del palo e le tensioni tangenziale che si sviluppano sono rivolte

verso il basso (*tensioni residue negative*), e una inferiore, in cui la situazione si inverte e le tensioni tangenziali sono rivolte verso l'alto (*tensioni residue positive*). Il punto di inversione delle tensioni tangenziali è definito asse neutro: dalla sperimentazione condotta da Colombi [2005], su pali idealmente trivellati ed infissi installati in sabbia, è possibile ritenere che l'asse di inversione sia localizzato nella metà inferiore del palo modello e che l'entità delle tensioni tangenziali residue sia minore alle alte densità relative (Fig. 2.7).

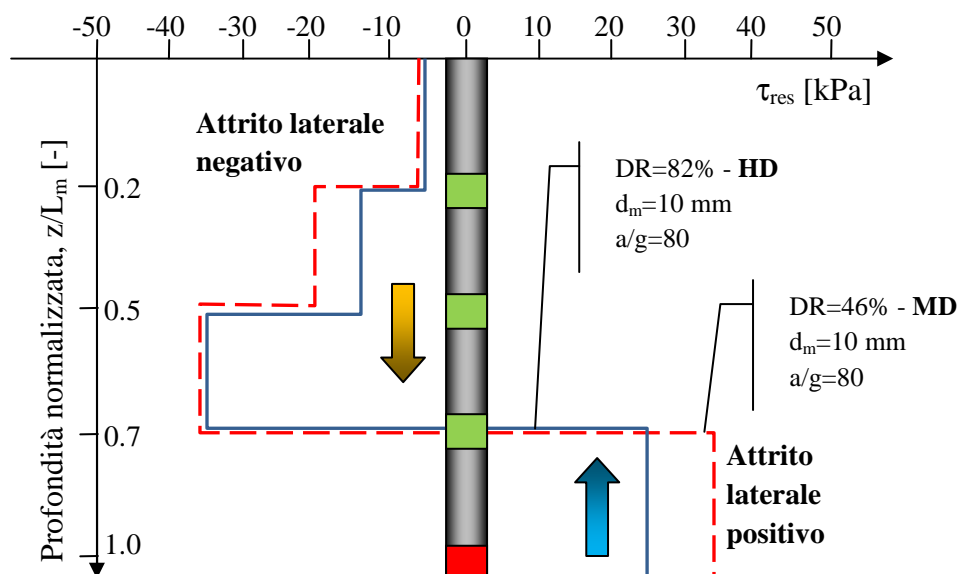
Il calcolo delle tensioni residue  $\tau_{res}$  medie, sull'intero palo e sui singoli conci, si esegue utilizzando la (2.5), la (2.8) e la (2.11), con  $A_s$  definita dalla (2.13), facendo riferimento alle forze lette dalle celle interne alla fine della consolidazione, ricordando che, in questa fase, il carico esterno è nullo.



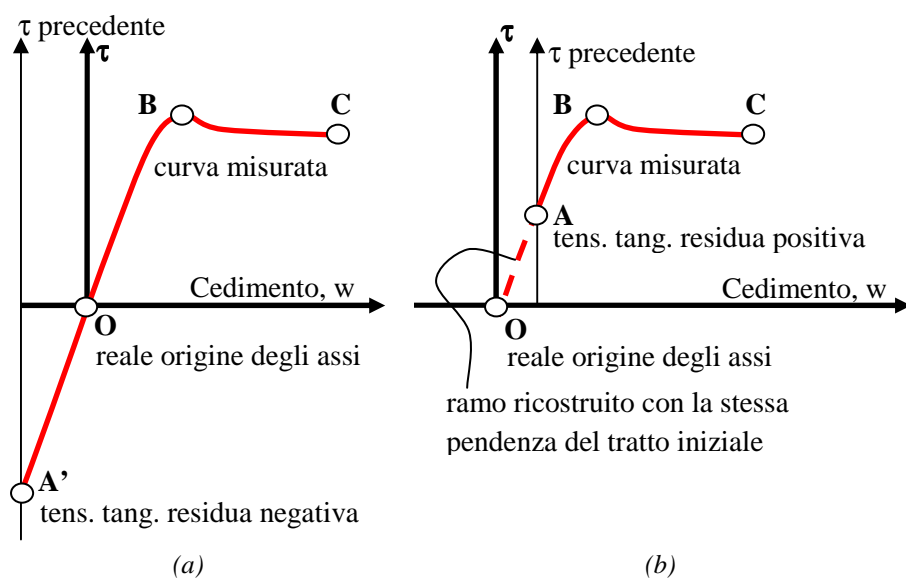
-Figura 2.6 – Cedimento relativo palo-sabbia alla fine della consolidazione.

Nel calcolo delle tensioni tangenziali che si sviluppano sul fusto del palo a seguito della prova di carico si sono tenute in conto le tensioni residue mobilitate durante la consolidazione, facendo riferimento alla Figura 2.8 e alla procedura di seguito descritta:

- *Tensione tangenziale residua negativa* (Fig. 2.8a)  
Il punto in cui la tensione tangenziale si azzera è considerato la corretta origine degli assi e le curve di mobilitazione sono traslate verso la nuova origine.
- *Tensione tangenziale residua positiva* (Fig. 2.8b)  
Si ricostruisce il ramo iniziale prolungando la curva di mobilitazione con pendenza costante e si individua la corretta origine degli assi nel punto in cui le tensioni tangenziali si annullano.



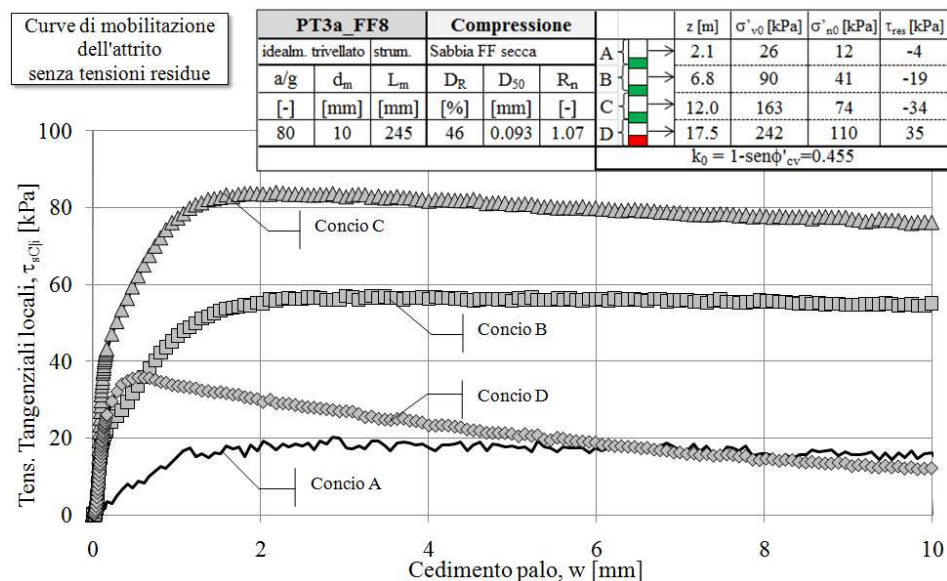
-Figura 2.7- Tensioni laterali residue su pali modello idealmente trivellati in sabbia [Colombi 2005].



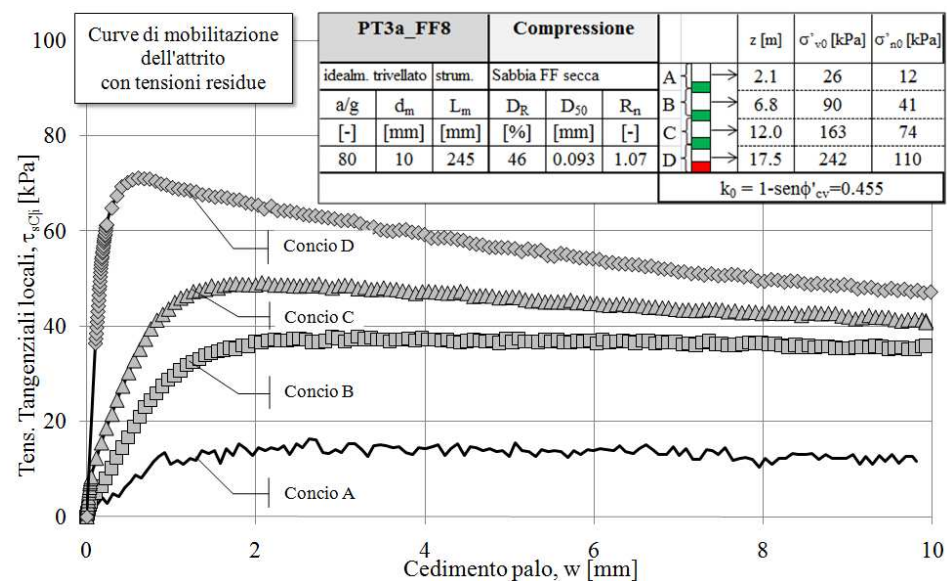
-Figura 2.8- Individuazione del punto di origine della curva di mobilitazione dell'attrito laterale.

A titolo di esempio, si riportano in Figura 2.9a le tensioni tangenziali medie ottenute localmente sui singoli conci per la prova di compressione PT3a\_FF8 calcolate non tenendo conto delle tensioni residue: il concio D più profondo sviluppa una resistenza attritiva fisicamente non

compatibile con la sua pressione di confinamento. Correggendo le curve con le tensioni residue, gli andamenti si dispongono nella corretta successione, con resistenze tangenziali direttamente proporzionali alle tensioni di confinamento (Fig. 2.9b).



-Figura 2.9a- Curve delle tensioni tangenziali medie agenti localmente sui singoli conci ottenute non tenendo in conto le tensioni residue.

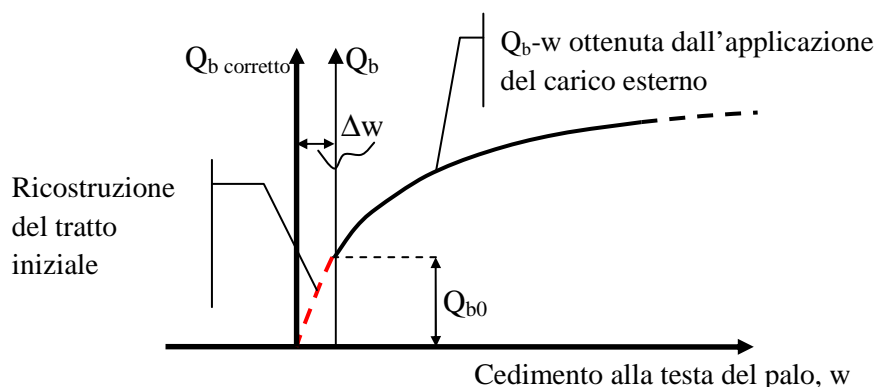


-Figura 2.9b- Curve delle tensioni tangenziali medie agenti localmente sui singoli conci ottenute tenendo conto delle tensioni residue.

Durante la fase di consolidazione in volo il palo mobilita, oltre alle tensioni tangenziali residue sul fusto, una portata di base residua  $Q_{b0}$ , di cui si deve tenere conto per una corretta interpretazione dei risultati.

Per considerare il contributo dovuto a  $Q_{b0}$ , le curve della portata di base  $Q_b-w$ , ottenute dall'applicazione del carico esterno, sono state opportunamente corrette come mostrato in Figura 2.10, attraverso la seguente procedura:

- 1- noto  $Q_{b0}$  dalla lettura della cella di base, si calcola la tangente al tratto iniziale della curva misurata
- 2- si estende la tangente fino a  $Q_b=0$
- 3- si valuta il cedimento della base del palo,  $\Delta w$ , in fase di consolidazione
- 4- si trasla la curva ricostruita della quantità  $\Delta w$ .

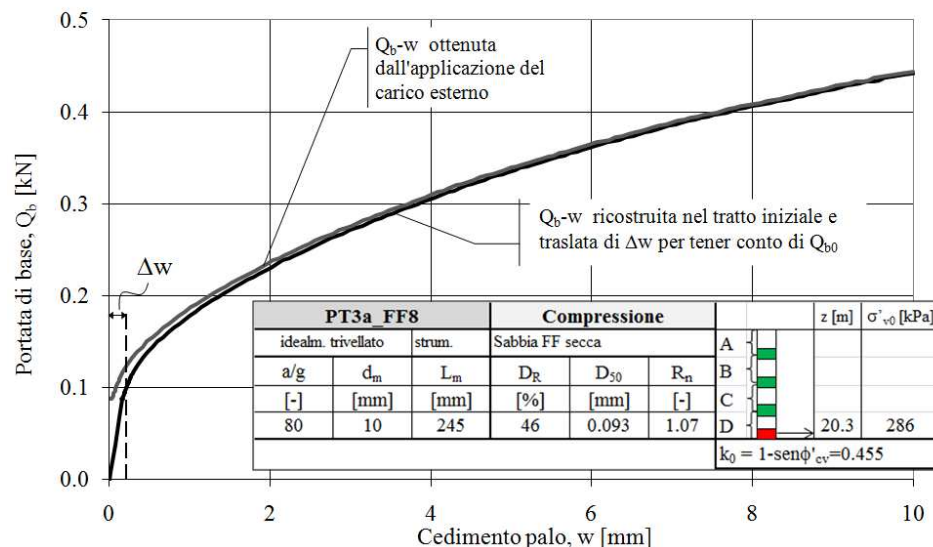


-Figura 2.10 – Ricostruzione del tratto iniziale della curva  $Q_b-w$  per tenere conto della portata di base residua  $Q_{b0}$ .

A titolo di esempio, sono mostrate in Figura 2.11 la curva della portata di base, prodotta dall'applicazione del carico esterno, e la sua correzione ricostruendo il tratto iniziale secondo la procedura rappresentata in Figura 2.10 e successivamente traslandola di  $\Delta w$ ; i dati sono riferiti alla prova di compressione in centrifuga eseguita a 80g sul palo modello  $d_m=10\text{mm}$  installato in un campione di sabbia FF ricostruito a MD (PT3a\_FF8).

Le curve di mobilitazione delle tensioni tangenziali e della portata di base unitarie, corrette tenendo conto delle tensioni residue, sono impiegate per le successive elaborazioni e riportate nell'Allegato B in cui sono inoltre rappresentati gli andamenti del carico esterno, e delle curve

di mobilitazione della portata laterale e di quella di base in funzione del cedimento  $w$ .



-Figura 2.11 – Esempio di ricostruzione del tratto iniziale e traslazione della curva  $Q_{b-w}$  per tenere conto della portata di base residua  $Q_{b0}$  (PT3a\_FF8).

## 2.4 INFLUENZA DELLA DIREZIONE DEL CARICO ASSIALE

Le evidenze sperimentali di prove in compressione e in trazione condotte su pali installati in sabbia principalmente per infissione, hanno portato a concludere che sembra esistere una dipendenza della risposta attritiva dalla direzione del carico assiale applicato. In particolare si evince che la portata laterale sviluppata in trazione,  $Q_{sT}$ , è minore di quella ottenuta in compressione,  $Q_{sC}$ , a parità di condizioni al contorno del sito e di geometria del palo testato, in quanto le tensioni tangenziali mobilitate in trazione risultano inferiori a quelle in compressione [Subba Rao e Venkatesh 1985; Craig e Sabagh 1994; De Nicola e Randolph 1993; Lehane et al. 1993; Balachowski 1995; De Nicola e Randolph 1999; O'Neill 2001].

Conferme alla differenza tensionale tra prove di trazione e compressione sono ricercate da De Nicola e Randolph [1993] nei risultati di prove di carico su pali in vera grandezza installati in siti prevalentemente sabbiosi. L'azzeramento della strumentazione interna al palo, prassi comunemente eseguita prima di iniziare la prova di carico, produce una sottostima della portata di base e una conseguente sovrastima di quella laterale, in quanto non si tengono in conto le tensioni

residue sviluppatasi durante l'installazione del palo e la maturazione del calcestruzzo. Alla luce di tale limitazione, che rende non attendibili i dati di una banca dati di prove di carico così eseguite, gli Autori hanno ricercato nella simulazione numerica le giustificazioni fisiche alla differenza tensionale tra trazione e compressione.

Le simulazioni numeriche condotte da De Nicola e Randolph [1993] su un palo infisso in terreno granulare modellato con un legame semplice di tipo elastico-perfettamente plastico con criterio di rottura alla Mohr-Coulomb, sia nella massa di terreno che all'interfaccia simulata al continuo, hanno evidenziato tre principali cause per la minore tensione tangenziale mobilitata in trazione:

1. *Effetto Poisson*: durante una prova in compressione il palo si espande lateralmente producendo un aumento delle tensioni normali alla sua superficie ed un conseguente aumento delle tensioni tangenziali agenti; al contrario, durante una prova in trazione, il palo subisce una strizione che porta ad una riduzione delle tensioni normali al fusto ed ad un conseguente calo delle tensioni di taglio.
2. *Variazione nelle tensioni totali*: a seguito dell'applicazione di una forza assiale di compressione si produce un incremento del campo delle tensioni totali, verticali e conseguentemente radiali, mentre l'azione di un carico di trazione porta ad una loro riduzione.
3. *Rotazione degli assi principali*: il cambiamento del campo tensionale induce una rotazione degli assi principali che, in trazione, contribuisce a ridurre la tensione normale al fusto del palo.

Il terzo punto ha avuto delle conferme dagli studi condotti da Lehane et al. [1993] su un palo modello liscio di grandi dimensioni, infisso in un terreno prevalentemente granulare; la strumentazione interna al modello ha monitorato la variazione delle tensioni radiali al fusto del palo.

Successivamente De Nicola e Randolph [1999] hanno condotto una vasta campagna sperimentale presso la centrifuga geotecnica della Western Australia University. Per le prove è impiegato un palo modello liscio infisso in sabbia ( $D_{50}=0.050$  mm), avente diametro di 16 mm e lunghezza variabile. Le prove sono eseguite ad una accelerazione di 100g su campioni di sabbia ricostruiti ad alta densità relativa (70% e  $\approx 100\%$ ) saturati a differenti livelli.

Per ciascuna prova i pali sono testati con cicli di carico e scarico invertendo la direzione della forza agente e confrontando le portate laterali ottenute: al primo ciclo di compressione segue un secondo ciclo di trazione. Il rapporto tra  $Q_{ST}$ , di trazione, e  $Q_{SC}$ , di compressione, è



mediamente  $Q_{sT}/Q_{sC}=0.5-0.7$ . Gli Autori giustificano il basso rapporto ottenuto a causa di una perdita di resistenza che si ha invertendo in due fasi di carico successive la direzione della forza assiale applicata. Per i pali a punta chiusa, non sono condotte prove in cui il carico di trazione precede quello di compressione.

Dalle conclusioni riportate da Kulhawy [2004], che ha analizzato i risultati di prove di carico in compressione e trazione su pali trivellati in vera grandezza installati in siti granulari prevalentemente sabbiosi, e da Krabbenhoft et al. [2006], che hanno interpretato con differenti approcci analitici i risultati di una campagna sperimentale su pali in vera grandezza trivellati in sabbia sottoposti a trazione, non sono evidenziate differenze tra le tensioni tangenziali mobilitate in trazione e quelle in compressione.

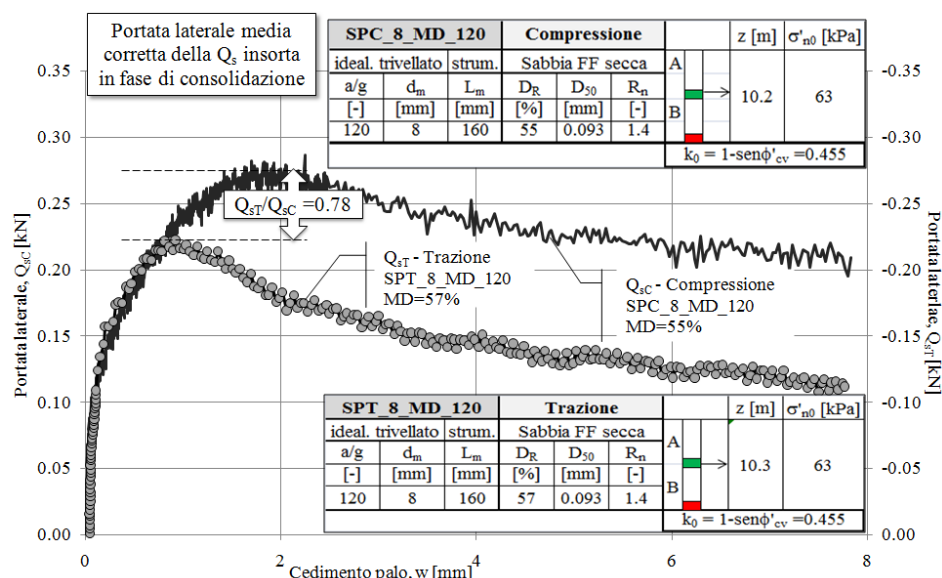
La ragione per la quale nell'interpretazione di prove su pali trivellati in vera grandezza non si evidenziano differenze tra le tensioni tangenziali in trazione e compressione, mentre queste erano marcate per i pali infissi, può essere legata alla maggiore importanza delle tensioni residue in questi ultimi.

Alcuni risultati di prove di modellazione fisica condotte presso la centrifuga del LCPC su pali trivellati a punta chiusa rugosi sono reperite nel lavoro presentato da Balachowski [1995] nel quale si riferisce di portate laterali  $Q_{sT}$  minori delle corrispondenti  $Q_{sC}$  con conseguenti tensioni tangenziali in trazione inferiori a quelle in compressione. L'ipotesi che l'autore avanza è che il minore attrito mobilitato in trazione sia dovuto ad uno spostamento della sabbia, posta attorno alla base, all'interno del vuoto lasciato libero dal palo che comporta una riduzione dello stato tensionale agente sul fusto a ridosso della punta.

Per approfondire l'influenza della direzione del carico assiale sulla mobilitazione delle tensioni tangenziali, sono analizzate le prove di modellazione fisica condotte presso la centrifuga IGC.

In Figura 2.12 sono riportate le curve di portata laterale ottenute da due prove di carico: la prima  $Q_{sC-w}$  è relativa alla prova di compressione (SPC\_8\_MD\_120), la seconda  $Q_{sT-w}$  a quella di trazione (SPT\_8\_MD\_120). Entrambe le prove sono condotte sul palo modello  $d_m=8$  mm installato in 2 campioni di sabbia ricostruiti a media densità ed accelerati a 120g. I valori di  $Q_s$  sono corretti tenendo conto delle tensioni residue mobilitate durante la fase di consolidazione.

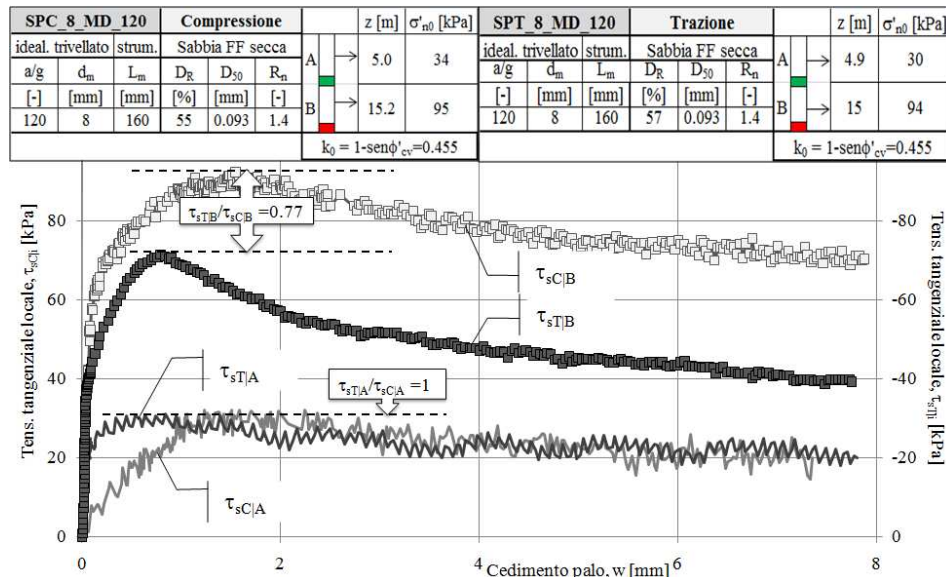
La portata laterale al picco  $Q_{sT}$ , mobilitata a seguito del carico assiale di trazione, è circa il 79% di quella massima raggiunta con il carico di compressione,  $Q_{sC}$ .



-Figura 2.12- Curve delle portate laterali per una prova in compressione (SPC\_8\_MD\_120) ed una in trazione (SPT\_8\_MD\_120).

Per indagare più a fondo la differenza tra le due portate laterali (Fig. 2.12), si esegue un'analisi delle tensioni tangenziali che localmente si sviluppano sui due conci che compongono il palo avente  $d_m=8$  mm. In Figura 2.13 si mostra il confronto tra le tensioni tangenziali che agiscono sul concio superiore, concio A, e su quello inferiore, concio B, in funzione di w, nelle due prove a media densità SPT\_8\_MD\_120 in trazione e SPC\_8\_MD\_120 in compressione.

In Figura 2.13, si osserva che sul concio superiore A la tensione tangenziale massima è uguale in entrambe le prove con le curve in trazione e in compressione che tendono a sovrapporsi all'aumentare di w. Diversamente, la tensione tangenziale massima mobilitata sul concio B nella prova di trazione è il 77% di quella raggiunta in compressione. La differenza tra le due curve,  $\tau_{sT|B} - w$  e  $\tau_{sC|B} - w$  non è costante ma aumenta con lo sfilamento.

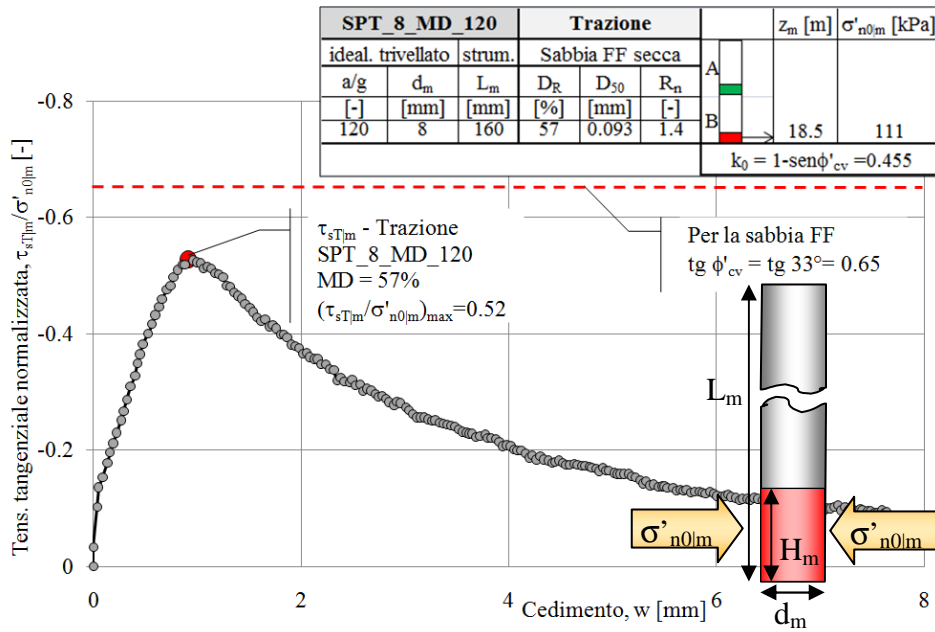


-**Figura 2.13**– Curve delle tensioni tangenziali agenti localmente sul concio A e B nelle prove di trazione (SPT\_8\_MD\_120) e di compressione (SPC\_8\_MD\_120).

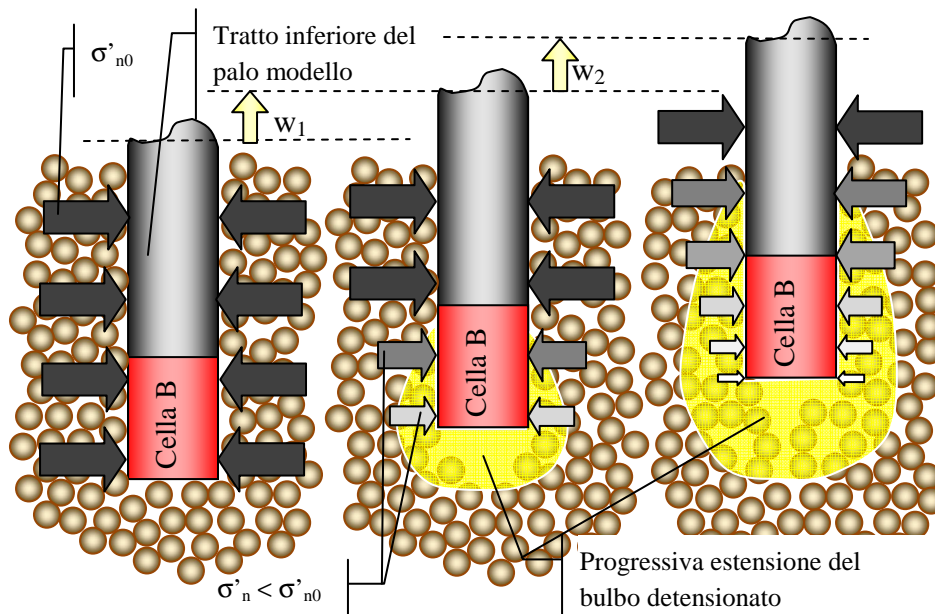
In Figura 2.14 si riportano, per la prova di trazione SPT\_8\_MD\_120, i valori della tensione tangenziale mobilitata sul manicotto di rivestimento della cella posta in punta al palo,  $\tau_{sT|m}$ , normalizzati rispetto a  $\sigma'_{n0|m}$ , tensione iniziale normale al manicotto di base, in funzione dello sfilamento  $w$ . Tali rapporti si mantengono sempre inferiori al valore 0.65, corrispondente alla  $\tan \phi'_{cv}$  della sabbia FF.

Appare quindi verosimile ritenere che attorno alla base vi sia una riduzione di  $\sigma'_n$  dovuta allo scivolamento delle particelle di sabbia all'interno del vuoto lasciato libero dalla punta del palo.

L'estensione di questo *bulbo detensionato* è variabile e dipende probabilmente dal diametro del palo, dalla tipologia di sabbia e dal suo grado di addensamento, inoltre aumenta progressivamente con lo sfilamento, come schematizzato in Figura 2.15.



-Figura 2.14- Curva normalizzata delle tensioni tangenziali agenti sul manicotto di base nella prova di trazione SPT\_8\_MD\_120.



-Figura 2.15- Schema della formazione e della propagazione del bulbo di detensionamento attorno alla base del palo modello.

Si è quindi ipotizzato che l'estensione del bulbo sia pari all'altezza del manicotto di base,  $H_m$ , e, assumendo nulla la tensione normale a quella superficie, si è ricalcolata la portata laterale media che risulta:

$$Q_{sT} = Q_{tot}^T - W_P - (\tau_{sT|m} \cdot H_m \cdot d_m \cdot \pi) \quad [F] \quad (2.14)$$

Dalla (2.14) sono state calcolate le tensioni tangenziali medie tenendo conto della riduzione dell'area laterale, definita  $A_s$ :

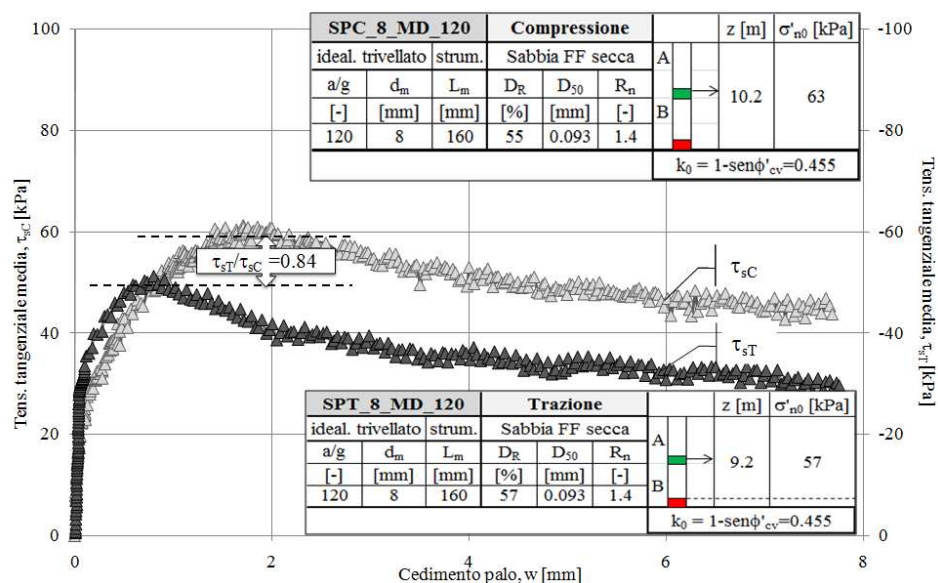
$$\tau_{sT} = Q_{sT} / A_s \quad [FL^{-2}] \quad (2.15)$$

Con:

$$A_s = \pi(d_m + 10D_{50})(L_m - H_m) \quad [L^2] \quad (2.16)$$

Per il calcolo delle tensioni di taglio, sviluppate durante la prova di trazione dal palo di 32 mm di diametro non strumentato, si fissa arbitrariamente che l'area detensionata abbia altezza pari a  $d_m$ .

In Figura 2.16 si riporta la curva delle tensioni tangenziali medianti agenti sul palo  $\tau_{sT} - w$ , ottenuta dalla prova in trazione SPT\_8\_MD\_120 utilizzando l'equazione (2.15), e la si confronta con l'omologa,  $\tau_{sC} - w$ , ricavata nelle stesse condizioni al contorno nella prova in compressione SPC\_8\_MD\_120.



-Figura 2.16- Curve delle tensioni tangenziali medie mobilitate nelle prove di trazione (SPT\_8\_MD\_120) e di compressione (SPC\_8\_MD\_120).

Lo scarto tra le tensioni tangenziali massime sviluppate nelle due prove si è ridotto diventando circa pari a 84%.

Non conoscendo la reale estensione della zona detensionata, i valori delle tensioni tangenziali medie in trazione, calcolate con la (2.15), sono assunti come valori di riferimento nelle analisi successive.

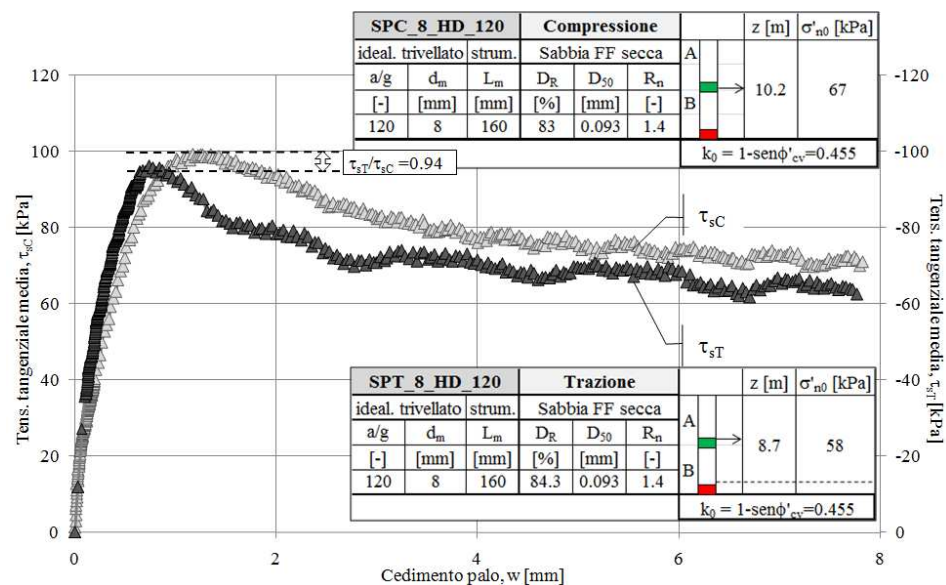
Per le prove in trazione, le tensioni di picco, per brevità denominata  $\tau_{su}$ , sono riassunte in Tabella 2.2a: per ciascuna è indicato il valore dello sfilamento a cui si mobilita la tensione massima in trazione,  $w_{su}$ , e la tensione normale media iniziale  $\sigma'_{n0}$  di riferimento. Analogamente, in Tabella 2.2b sono riassunti i valori tensionali  $\tau_{su}$  e  $\sigma'_{n0}$  e il cedimento  $w_{su}$  ottenuti dall'interpretazione delle prove in centrifuga con carico di compressione.

In conclusione, dai risultati mostrati, è possibile affermare che la differenza riscontrata sperimentalmente tra le tensioni tangenziali medie, sviluppate in trazione e in compressione, è imputabile alla formazione di un bulbo detensionato attorno alla base. Esso si genera, nelle prove di trazione, per piccolissimi sfilamenti del palo e aumenta la sua estensione al progredire di  $w$  (Fig. 2.15). In tale zona le tensioni normali al fusto del palo si riducono rispetto al valore iniziale  $\sigma'_{n0}$  (Fig. 2.14) producendo localmente un minore attrito laterale all'interfaccia, come rilevato per il concio inferiore B, e globalmente una riduzione della portata laterale  $Q_{sT}$ . Al contrario, nella parte superiore del palo modello, identificata con il concio A (Fig. 2.13), sufficientemente lontana dalla zona disturbata alla base, le tensioni tangenziali al picco, sviluppate in trazione, sono uguali a quelle ottenute in compressione.

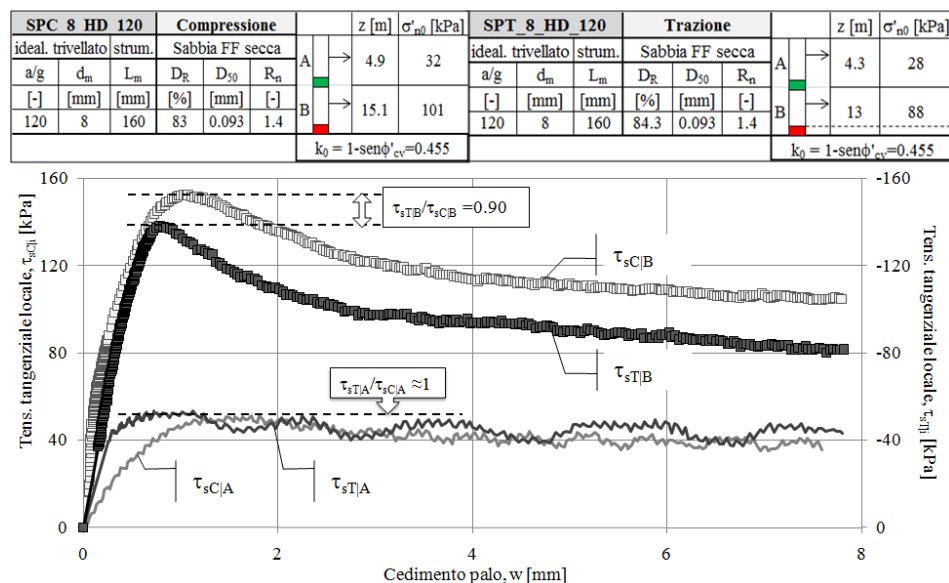
Nelle Figure 2.17 e 2.18 è presentato, a titolo esemplificativo, il confronto tra le curve di mobilitazione dell'attrito medio e locale per due prove, una in trazione e l'altra in compressione, condotte sul palo modello  $d_m=8$  mm installato in un campione di sabbia ricostruito ad alta densità relativa ed accelerato a 120g. Esse evidenziano lo stesso comportamento, descritto per la media densità, mostrando tuttavia una minore rilevanza del fenomeno di detensionamento alla base [Lehane et al. 1993], probabilmente a causa di un *effetto arco* più significativo nelle sabbie dense.

Per i pali reali, in cui gli sfilamenti in trazione sono verosimilmente piccoli rispetto alla lunghezza del fusto, l'effetto di disturbo alla base indotto dal bulbo detensionato si ritiene limitato o addirittura trascurabile: a seguito di un carico assiale di trazione o di compressione ci si aspetta perciò la mobilitazione delle medesime tensioni tangenziali

medie sul fusto. Tale conclusione appare concorde con le evidenze sperimentali presentate da Kulhawy [2004] e Krabbenhoft et al. [2006].



-Figura 2.17- Curve delle tensioni tangenziali medie mobilitate nelle prove di trazione (SPT\_8\_HD\_120) e di compressione (SPC\_8\_HD\_120).



-Figura 2.18- Curve delle tensioni tangenziali agenti localmente sul concio A e B nelle prove di trazione (SPT\_8\_HD\_120) e di compressione (SPC\_8\_HD\_120).

| Prove di carico in trazione |               |               |       |     |              |              |                      |                  |                         |
|-----------------------------|---------------|---------------|-------|-----|--------------|--------------|----------------------|------------------|-------------------------|
| Nome prova                  | Modello       |               | $D_R$ | a/g | Prototipo    |              | Valori al picco      |                  |                         |
|                             | $d_m$<br>[mm] | $L_m$<br>[mm] | [%]   | [-] | $D_p$<br>[m] | $L_p$<br>[m] | $\tau_{su}$<br>[kPa] | $w_{su}$<br>[mm] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] |
| SPT_8_MD_30                 | 8             | 160           | 55.1  | 30  | 0.24         | 4.8          | 12.6                 | 0.74             | 12.8                    |
| SPT_8_MD_60                 | 8             | 160           | 55.3  | 60  | 0.48         | 9.6          | 25.3                 | 0.87             | 28.5                    |
| SPT_8_MD_120                | 8             | 160           | 57.5  | 120 | 0.96         | 19.2         | 49.5                 | 0.80             | 57.2                    |
| SPT_8_MD_160                | 8             | 160           | 57.2  | 160 | 1.28         | 25.6         | 49.6                 | 0.87             | 67.6                    |
| SPT_8_HD_30                 | 8             | 160           | 82.6  | 30  | 0.24         | 4.8          | 30.5                 | 0.75             | 14.0                    |
| SPT_8_HD_60                 | 8             | 160           | 83.0  | 60  | 0.48         | 9.6          | 41.9                 | 0.73             | 33.7                    |
| SPT_8_HD_120                | 8             | 160           | 84.3  | 120 | 0.96         | 19.2         | 93.2                 | 0.65             | 57.8                    |
| SPT_8_HD_160                | 8             | 160           | 86.7  | 160 | 1.28         | 25.6         | 110                  | 0.76             | 73.6                    |
| PT1_FF32                    | 10            | 245           | 43.3  | 30  | 0.30         | 7.4          | 15.5                 | 1.39             | 22.5                    |
| PT1_FF38                    | 10            | 245           | 50.5  | 80  | 0.80         | 19.6         | 34.7                 | 1.87             | 59.2                    |
| PT1_FF31                    | 10            | 245           | 55.0  | 130 | 1.30         | 31.9         | 54.2                 | 1.67             | 99.1                    |
| PT1_FF45                    | 10            | 245           | 43.3  | 30  | 0.30         | 7.4          | 18.5                 | 1.42             | 22.4                    |
| PT1_FF44                    | 10            | 245           | 46.3  | 80  | 0.80         | 19.6         | 47.3                 | 1.05             | 59.4                    |
| PT1_FF43                    | 10            | 245           | 44.8  | 130 | 1.30         | 31.9         | 56.6                 | 1.70             | 95.6                    |
| PT1_FF29                    | 10            | 245           | 76.4  | 30  | 0.30         | 7.4          | 30.0                 | 0.89             | 24.6                    |
| PT1_FF33                    | 10            | 245           | 83.0  | 80  | 0.80         | 19.6         | 70.1                 | 1.09             | 32.6                    |
| PT1_FF30                    | 10            | 245           | 85.9  | 130 | 1.30         | 31.9         | 97.0                 | 1.28             | 53.0                    |
| PT1_FF47                    | 10            | 245           | 76.1  | 30  | 0.30         | 7.4          | 40.8                 | 0.90             | 24.3                    |
| PT1_FF42                    | 10            | 245           | 75.9  | 80  | 0.80         | 19.6         | 81.5                 | 1.01             | 64.5                    |
| PT1_FF46                    | 10            | 245           | 75.1  | 130 | 1.30         | 31.9         | 135.3                | 1.05             | 105.8                   |
| SPT_16_MD_30                | 16            | 320           | 54.7  | 30  | 0.48         | 9.6          | 15.4                 | 1.13             | 29.2                    |
| SPT_16_MD_80                | 16            | 320           | 58.5  | 80  | 1.28         | 25.6         | 50.1                 | 1.00             | 81.4                    |
| SPT_16_HD_30                | 16            | 320           | 81.5  | 30  | 0.48         | 9.6          | 49.5                 | 0.97             | 31.8                    |
| SPT_16_HD_80                | 16            | 320           | 83.5  | 80  | 1.28         | 25.6         | 108                  | 1.11             | 87.3                    |
| PULL 1                      | 32            | 320           | 44.4  | 30  | 0.96         | 9.6          | 19.9                 | 1.20             | 29.3                    |
| PULL 2                      | 32            | 320           | 45.5  | 80  | 2.56         | 25.6         | 49.1                 | 1.47             | 77.3                    |
| PULL 3                      | 32            | 320           | 50.0  | 130 | 4.16         | 41.6         | 79.9                 | 1.51             | 127.5                   |
| PULL 8                      | 32            | 320           | 45.9  | 30  | 0.96         | 9.6          | 19.3                 | 1.14             | 29.1                    |
| PULL 9                      | 32            | 320           | 51.3  | 80  | 2.56         | 25.6         | 49.2                 | 1.43             | 78.1                    |
| PULL 4                      | 32            | 320           | 81.4  | 130 | 4.16         | 41.6         | 129                  | 1.15             | 138.3                   |
| PULL 5                      | 32            | 320           | 84.3  | 80  | 2.56         | 25.6         | 74.3                 | 1.17             | 86.5                    |
| PULL 6                      | 32            | 320           | 83.9  | 30  | 0.96         | 9.6          | 35.9                 | 1.32             | 32                      |
| PULL 7                      | 32            | 320           | 84.5  | 30  | 0.96         | 9.6          | 42.2                 | 1.65             | 32.3                    |
| PULL 10                     | 32            | 320           | 84.0  | 80  | 2.56         | 25.6         | 85.9                 | 1.00             | 85.7                    |
| PULL 11                     | 32            | 320           | 85.0  | 130 | 4.16         | 41.6         | 141                  | 1.22             | 139.3                   |
| PULL 12                     | 32            | 320           | 84.6  | 30  | 0.96         | 9.6          | 43.2                 | 1.31             | 32.5                    |

*-Tabella 2.2a – Quadro riassuntivo dei valori di picco delle tensioni tangenziali ottenuti dalle prove di carico in trazione ( $w_{su}$  in scala modello).*



| Prove di carico in compressione |               |               |       |       |              |              |                      |                  |                         |
|---------------------------------|---------------|---------------|-------|-------|--------------|--------------|----------------------|------------------|-------------------------|
| Nome prova                      | Modello       |               | $D_R$ | $a/g$ | Prototipo    |              | Valori al picco      |                  |                         |
|                                 | $d_m$<br>[mm] | $L_m$<br>[mm] | [%]   | [-]   | $D_p$<br>[m] | $L_p$<br>[m] | $\tau_{su}$<br>[kPa] | $w_{su}$<br>[mm] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] |
| SPC_8_MD_30                     | 8             | 160           | 50.3  | 30    | 0.24         | 4.8          | 15.2                 | 1.22             | 15.6                    |
| SPC_8_MD_60                     | 8             | 160           | 52.7  | 60    | 0.48         | 9.6          | 31.8                 | 1.72             | 31.2                    |
| SPC_8_MD_120                    | 8             | 160           | 55.2  | 120   | 0.96         | 19.2         | 60.7                 | 1.91             | 63.1                    |
| SPC_8_MD_160                    | 8             | 160           | 57.9  | 160   | 1.28         | 25.6         | 70.5                 | 1.91             | 83.4                    |
| SPC_8_HD_30                     | 8             | 160           | 81.5  | 30    | 0.24         | 4.8          | 37.2                 | 1.13             | 16.7                    |
| SPC_8_HD_60                     | 8             | 160           | 82.5  | 60    | 0.48         | 9.6          | 56.0                 | 1.17             | 33.6                    |
| SPC_8_HD_120                    | 8             | 160           | 82.8  | 120   | 0.96         | 19.2         | 99.2                 | 1.25             | 67.2                    |
| SPC_8_HD_160                    | 8             | 160           | 83.2  | 160   | 1.28         | 25.6         | 114.0                | 1.24             | 87.8                    |
| PT3a_FF1                        | 10            | 245           | 56.2  | 30    | 0.30         | 7.4          | 13.6                 | 2.08             | 24.5                    |
| PT3a_FF7                        | 10            | 245           | 43.5  | 30    | 0.30         | 7.4          | 20.4                 | 1.67             | 23.6                    |
| PT3a_FF8                        | 10            | 245           | 45.9  | 80    | 0.80         | 19.6         | 42.7                 | 1.67             | 62.0                    |
| PT3a_FF2                        | 10            | 245           | 41.7  | 80    | 0.80         | 19.6         | 47.2                 | 1.80             | 60.6                    |
| PT1_FF28                        | 10            | 245           | 50.9  | 80    | 0.80         | 19.6         | 50.8                 | 1.79             | 63.3                    |
| PT3a_FF6                        | 10            | 245           | 45.8  | 130   | 1.30         | 31.9         | 77.0                 | 1.94             | 100.0                   |
| PT3a_FF9                        | 10            | 245           | 85.1  | 30    | 0.30         | 7.4          | 27.0                 | 1.34             | 26.7                    |
| PT3a_FF3                        | 10            | 245           | 82.3  | 80    | 0.80         | 19.6         | 59.7                 | 1.48             | 67.9                    |
| PT3a_FF5                        | 10            | 245           | 83.7  | 130   | 1.30         | 31.9         | 85.6                 | 1.53             | 111.5                   |
| SPC_16_MD_30                    | 16            | 320           | 51.9  | 30    | 0.48         | 9.6          | 27.0                 | 3.80             | 30.2                    |
| SPC_16_MD_80                    | 16            | 320           | 57.4  | 80    | 1.28         | 25.6         | 64.0                 | 4.60             | 80.1                    |
| SPC_16_HD_30                    | 16            | 320           | 80.3  | 30    | 0.48         | 9.6          | 54.7                 | 1.41             | 32.3                    |
| SPC_16_HD_80                    | 16            | 320           | 83.2  | 80    | 1.28         | 25.6         | 112.7                | 1.81             | 93.3                    |

*-Tabella 2.2b – Quadro riassuntivo dei valori di picco delle tensioni tangenziali ottenuti dalle prove di carico in compressione ( $w_{su}$  in scala modello).*

## 2.5 MODELLO DEL MODELLO

Come discusso al Capitolo 1, la sperimentazione in centrifuga geotecnica su modelli in scala ridotta può essere condizionata da effetti scala che, se non opportunamente minimizzati, possono condizionare la corretta trasposizione dei risultati dal modello al prototipo.

Gli effetti scala che riguardano il comportamento dei pali caricati assialmente in un terreno sabbioso omogeneo sono connessi a:

1. geometria del contenitore di prova rispetto a quella del palo modello;
2. rugosità normalizzata,  $R_n$ ;
3. rapporto tra la dimensione dei grani che costituiscono il terreno e il diametro del palo modello,  $d_m/D_{50}$ ;
4. livello di accelerazione imposto nella prova,  $a/g$ ;

5. dimensione dell'inclusione-modello, che può essere definito *effetto k* (o *arching effect*), indicando con  $k$  la rigidezza radiale all'inclusione.

Gli effetti bordo analizzati nel Capitolo 1 sono stati valutati trascurabili nella sperimentazione condotta; dell'effetto di  $R_n$  si parlerà in modo diffuso nel Capitolo 3, mentre un'analisi dettagliata rispetto ai rapporti  $d_m/D_{50}$  e  $a/g$  sarà descritta al Capitolo 4.

L'effetto  $k$  è stato invece analizzato nel seguito.

La miglior tecnica disponibile per il controllo degli effetti scala è la “*modellazione del modello*”, ovvero l'esecuzione di prove su modelli realizzati in scale geometriche diverse che simulano lo stesso prototipo (Fig. 2.19). Se i risultati ottenuti dai differenti modelli sono uguali la risposta ricavata non è condizionata dall'effetto scala analizzato.

La schematizzazione di tale procedimento e dei principi cui esso fa riferimento sono riportati nelle Figure 2.19 e 2.20.

Boulon e Foray [1986] hanno teorizzato che il comportamento dilatante della sabbia nella zona di interfaccia possa essere la principale causa della mobilitazione di maggiori tensioni tangenziali su inclusioni di piccolo diametro rispetto a quelle del palo reale.

Assumendo una analogia comportamentale tra il meccanismo di mobilitazione dell'attrito sul palo e quello teorico della cavità espansa di forma cilindrica in terreno sabbioso, l'incremento tensionale normale alla superficie del fusto,  $\Delta\sigma'_n$ , è espresso come [Lehane et al. 1993]:

$$\Delta\sigma'_n = \frac{4G}{D} \Delta y = k \Delta y \quad [FL^{-2}] \quad (2.17)$$

Con:

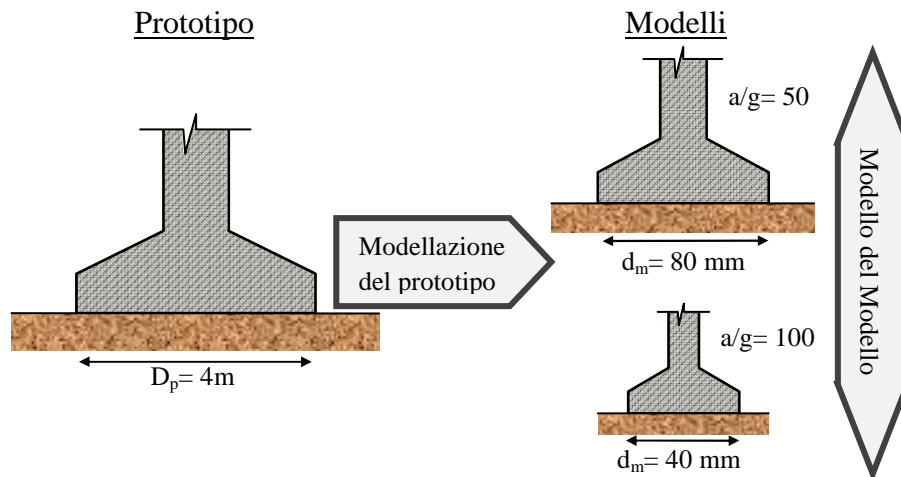
$G$  = modulo di taglio del terreno di prova

$\Delta y$  = spostamento radiale delle particelle poste nella fascia di interfaccia

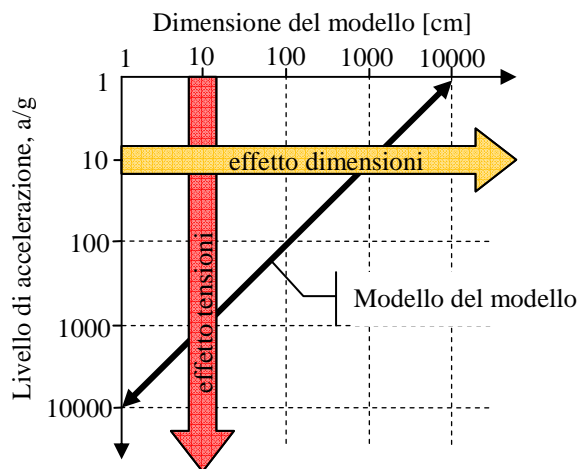
$D$  = diametro dell'inclusione

$k$  = rigidezza radiale del terreno attorno al fusto del palo

Evidenze sperimentali in scala ridotta e in vera grandezza, condotte principalmente su inclusioni lisce installate per infissione in sabbia, indicano che le tensioni tangenziali, mobilitate sul fusto del palo modello durante una prova di carico o di trazione, crescono proporzionalmente a  $\Delta\sigma'_n$  e sono per tale motivo interessate dall'effetto  $k$ , che aumenta al diminuire della dimensione dell'inclusione [Wernick 1978; Boulon e Foray 1986; Boulon 1988; Jardine et al. 1993; Turner e Kulhawy 1994; Balachowski 1995; Foray et al. 1998; Balachowski 2006].



-Figura 2.19– Rappresentazione della modellazione dei modelli.



-Figura 2.20– Principi della modellazione dei modelli.

L'effetto  $k$  è analizzato con la tecnica della modellazione del modello, utilizzando 16 prove in centrifuga (Tabb. 2.2a e 2.2b), che simulano due diversi pali prototipo a superficie rugosa, entrambi trivellati. Le prove sono condotte a due densità relative, media ( $\approx 55\%$ ) e alta ( $\approx 83\%$ ), applicando carichi assiali di trazione e compressione.

Due pali modello, indicati con  $p1$  e  $p2$  di diametro 8 mm e 16 mm rispettivamente, sono sottoposti, il primo a 60g e 160g, e il secondo a 30g e 80g, in maniera tale che il modello  $p1$  accelerato a 60g rappresenti lo stesso prototipo P1 del modello  $p2$  a 30g e che  $p1$  a 160g rappresenti lo

stesso prototipo P2 del modello  $p2$  a 80g, come schematizzato in Figura 2.21.

Le tensioni tangenziali massime (Tabb. 2.3a e 2.3b) sono diagrammate in Figura 2.22 per ciascun prototipo: gli scarti tra i valori di attrito mobilitati sul palo modello  $d_m=8$  mm,  $\tau_{su|d_m=8mm}$ , e quelli relativi al palo  $d_m=16$  mm,  $\tau_{su|d_m=16mm}$ , sono minimi e si riducono al crescere della tensione normale iniziale,  $\sigma'_{n0}$ . In particolare si osserva che per il P1, il rapporto  $\Delta\tau$  definito come:

$$\Delta\tau = \frac{\tau_{su|d_m=8mm}}{\tau_{su|d_m=16mm}} \quad [-] \quad (2.18)$$

è compreso tra  $\pm 15\%$ ; fa eccezione il confronto a MD tra le due prove in trazione (SPT\_8\_MD\_60 e SPT\_16\_MD\_30) per le quali l'errore è circa del 60%, probabilmente dipendente da problematiche di ricostruzione del modello. Per il secondo prototipo, P2, lo scarto ottenuto è invece molto limitato, con  $\Delta\tau$  minore di  $\pm 10\%$ , ad entrambe le  $D_R$ .

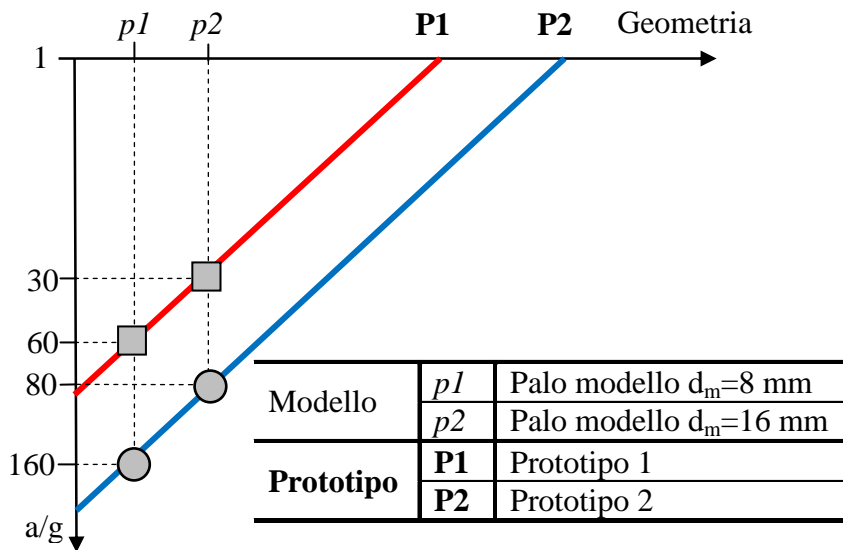


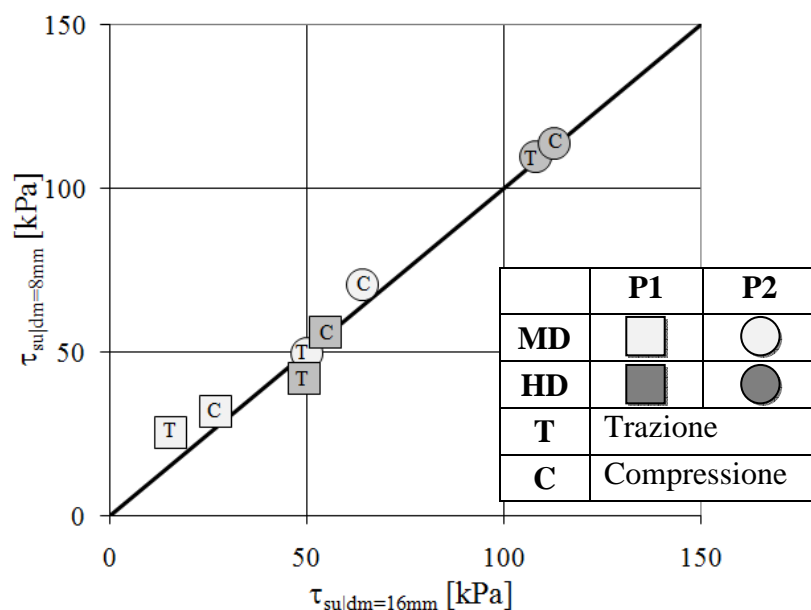
Figura 2.21– Costruzione dei 2 modelli del modello.

| PROTOTIPO 1 |                      | $D_p$ [m]    | 0.48         | $L_p$ [m]   | 9.6          |
|-------------|----------------------|--------------|--------------|-------------|--------------|
|             |                      | Compressione |              | Trazione    |              |
| MD<br>55%   | Prova                | SPC_8_MD_60  | SPC_16_MD_30 | SPT_8_MD_60 | SPT_16_MD_30 |
|             | $d_m$ [mm]           | 8            | 16           | 8           | 16           |
|             | $L_m$ [mm]           | 160          | 320          | 160         | 320          |
|             | $a/g$ [-]            | 60           | 30           | 60          | 30           |
|             | $\tau_{su}$ [kPa]    | 31.8         | 27           | 25.3        | 15.6         |
|             | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | 31.2         | 30.2         | 28.5        | 29.2         |
| HD<br>82%   | Prova                | SPC_8_HD_60  | SPC_16_HD_30 | SPT_8_HD_60 | SPT_16_HD_30 |
|             | $d_m$ [mm]           | 8            | 16           | 8           | 16           |
|             | $L_m$ [mm]           | 160          | 320          | 160         | 320          |
|             | $a/g$ [-]            | 60           | 30           | 60          | 30           |
|             | $\tau_{su}$ [kPa]    | 56           | 54.7         | 41.9        | 49.5         |
|             | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | 33.6         | 32.3         | 33.7        | 31.8         |

*-Tabella 2.3a – Prove in centrifuga che simulano il Prototipo 1 a MD e HD con carico assiale di compressione e di trazione.*

| PROTOTIPO 2 |                      | $D_p$ [m]    | 1.28         | $L_p$ [m]    | 25.6         |
|-------------|----------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
|             |                      | Compressione |              | Trazione     |              |
| MD<br>57%   | Prova                | SPC_8_MD_160 | SPC_16_MD_80 | SPT_8_MD_160 | SPT_16_MD_80 |
|             | $d_m$ [mm]           | 8            | 16           | 8            | 16           |
|             | $L_m$ [mm]           | 160          | 320          | 160          | 320          |
|             | $a/g$ [-]            | 160          | 80           | 160          | 80           |
|             | $\tau_{su}$ [kPa]    | 70.5         | 64.0         | 49.6         | 50.1         |
|             | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | 83.4         | 80.1         | 67.6         | 81.4         |
| HD<br>83%   | Prova                | SPC_8_HD_160 | SPC_16_HD_80 | SPT_8_HD_160 | SPT_16_HD_80 |
|             | $d_m$ [mm]           | 8            | 16           | 8            | 16           |
|             | $L_m$ [mm]           | 160          | 320          | 160          | 320          |
|             | $a/g$ [-]            | 160          | 80           | 160          | 80           |
|             | $\tau_{su}$ [kPa]    | 116          | 113          | 110          | 108          |
|             | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | 87.8         | 93.3         | 73.6         | 87.3         |

*-Tabella 2.3b – Prove in centrifuga che simulano il Prototipo 2 a MD e HD con carico assiale di compressione e di trazione.*



-Figura 2.22– Modello del modello per il Prototipo 1 e Prototipo 2.

I risultati ottenuti dai modelli del modello realizzati (Fig. 2.22), portano ad escludere la presenza di un sistematico effetto  $k$ , in quanto, a meno di piccoli scarti sperimentali di segno alterno, le tensioni tangenziali di picco, ottenute con due pali modello di diverso diametro che simulano i medesimi prototipi, sono le stesse e quindi indipendenti da  $d_m$ . Schematizzando il risultato ottenuto si ha che:

$$\tau_{su|dm=8mm} \approx \tau_{su|dm=16mm} \quad \rightarrow \quad \Delta\sigma'_{n|dm=8mm} \approx \Delta\sigma'_{n|dm=16mm}$$

Se ci fosse stato effetto  $k$  si sarebbe dovuto osservare sistematicamente:

$$\tau_{su|dm=8mm} > \tau_{su|dm=16mm} \quad \rightarrow \quad \Delta\sigma'_{n|dm=8mm} \approx 2\Delta\sigma'_{n|dm=16mm}$$

## 2.6 EFFETTI SCALA SULLO SPOSTAMENTO AL PICCO $w_{su}$

Lo spostamento all'interfaccia  $w_{su}$  in corrispondenza del quale si raggiunge la tensione di attrito di picco,  $\tau_{su}$ , ha particolare rilevanza sia per aspetti legati alla modellazione fisica in scala ridotta che per aspetti pratico-progettuali.

In letteratura sono disponibili dati riguardanti prove di pull-out di piastre rugose (Tab. 2.4a) e di pali modello (Tab. 2.4b) installati in

campioni di sabbia secca Fontainebleau ed accelerati tra 10g e 50g [Garnier e König 1998]. Altri dati riguardano pali modello rugosi trivellati, sottoposti a prove di trazione, in sabbia densa UWA secca in cui il campo di accelerazione spazia da 30g a 180g (Tab.2.5) [Lehane et al. 2005].

I valori  $w_{su}$  riportati nelle Tabelle 2.2a e 2.2b, tengono in conto degli spostamenti in fase di consolidazione, che hanno prodotto le tensioni residue.

| PROVE DI PULL-OUT - PIASTRA RUGOSA |       |                  |              |            |
|------------------------------------|-------|------------------|--------------|------------|
| Sabbia Fontainebleau secca         |       | $D_{50}=0.21$ mm |              | $D_R=85\%$ |
| $d_m$                              | $L_m$ | $a/g$            | $d_m/D_{50}$ | $w_{su}$   |
| [mm]                               | [mm]  | [-]              | [-]          | [mm]       |
| -                                  | 320   | 10               | -            | 1.80       |
| -                                  | 320   | 10               | -            | 2.10       |
| -                                  | 320   | 10               | -            | 1.90       |
| -                                  | 213   | 15               | -            | 1.67       |
| -                                  | 160   | 20               | -            | 1.28       |
| -                                  | 160   | 20               | -            | 1.15       |
| -                                  | 160   | 20               | -            | 1.13       |
| -                                  | 128   | 25               | -            | 1.08       |
| -                                  | 107   | 30               | -            | 0.80       |
| -                                  | 80    | 40               | -            | 0.75       |
| -                                  | 80    | 40               | -            | 0.94       |

-Tabella 2.4a – Prove di pull-out su una piastra rugosa [Garnier e König, 1998].

| PROVE DI PULL-OUT -<br>PALI MODELLO RUGOSI A PUNTA CHIUSA, TRIVELLATI |       |                  |              |            |
|---|-------|------------------|--------------|------------|
| Sabbia Fontanebleau secca   |       | $D_{50}=0.21$ mm |              | $D_R=50\%$ |
| $d_m$   | $L_m$ | $a/g$            | $d_m/D_{50}$ | $w_{su}$   |
| [mm]  | [mm]  | [-]              | [-]          | [mm]       |
| 2   | -     | 50               | 10           | 0.62       |
| 2   | -     | 50               | 10           | 0.75       |
| 4   | -     | 50               | 19           | 0.71       |
| 4   | -     | 50               | 19           | 0.81       |
| 6   | -     | 50               | 29           | 0.87       |
| 6   | -     | 50               | 29           | 0.94       |
| 12  | -     | 50               | 57           | 0.8        |
| 26  | -     | 50               | 124          | 1.06       |
| 36  | -     | 50               | 171          | 1.16       |

-Tabella 2.4b – Prove di pull-out su pali modello rugosi [Garnier e König, 1998].

| PROVE DI PULL-OUT -<br>PALI MODELLO RUGOSI A PUNTA CHIUSA, TRIVELLATI |       |                  |              |            |
|---|-------|------------------|--------------|------------|
| Sabbia UWA secca  |       | $D_{50}=0.20$ mm |              | $D_R=85\%$ |
| $d_m$   | $L_m$ | $a/g$            | $d_m/D_{50}$ | $w_{su}$   |
| [mm]  | [mm]  | [-]              | [-]          | [mm]       |
| 3   | 130   | 30               | 15           | 1.29       |
| 5   | 130   | 30               | 25           | 1.23       |
| 10  | 130   | 30               | 50           | 1.06       |
| 18  | 130   | 30               | 90           | 1.23       |
| 3   | 130   | 49.8             | 15           | 1.34       |
| 5   | 130   | 49.8             | 25           | 1.29       |
| 10  | 130   | 49.8             | 50           | 1.18       |
| 18  | 130   | 49.8             | 90           | 1.5        |
| 3   | 130   | 99.6             | 15           | 1.34       |
| 5   | 130   | 99.6             | 25           | 1.3        |
| 10  | 130   | 99.6             | 50           | 1.69       |
| 18  | 130   | 99.6             | 90           | 1.59       |
| 3   | 130   | 179.3            | 15           | 1.9        |
| 5   | 130   | 179.3            | 25           | 1.5        |
| 10  | 130   | 179.3            | 50           | 1.75       |
| 18  | 130   | 179.3            | 90           | 1.69       |

-Tabella 2.5 – Prove di pull-out su pali modello rugosi [Lehane et al., 2005].

In Figura 2.23a, relativa a prove di carico assiale in compressione, e in Figura 2.23b, per quelle in trazione, sono mostrati, in scala modello, gli andamenti dei cedimenti al picco tensionale in funzione del valore di  $d_m/D_{50}$ .

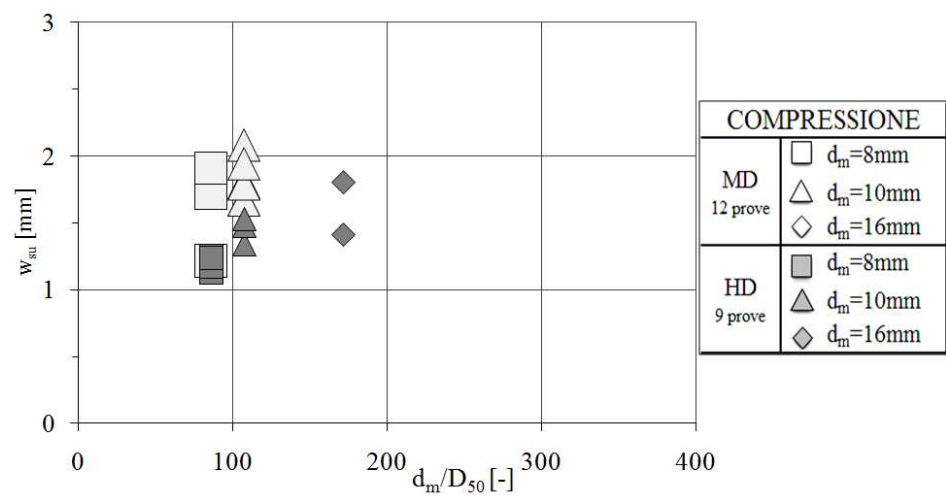
Dai risultati delle prove di carico a media ed alta densità (Figg. 2.23a e 2.23b) è possibile osservare una sostanziale indipendenza del cedimento  $w_{su}$  dal diametro del palo modello ad entrambi i livelli di addensamento, almeno per rapporti  $d_m/D_{50} \geq 50$ .

In Figura 2.23b sono riportati anche i risultati di Garnier e König [1998] e Lehane et al. [2005] relativi a prove di pull-out eseguite su pali rugosi trivellati. I valori sono giudicati in accordo fra loro, confermando che lo sfilamento  $w_{su}$  per raggiungere la massima tensione di trazione è compreso mediamente tra 0.6 mm e 2 mm con una maggiore dispersione sperimentale per  $d_m/D_{50} < 50$ . Analogamente i cedimenti  $w_{su}$ , dovuti ad un carico assiale di compressione, oscillano tra 1 mm e 2 mm (Fig. 2.23a).

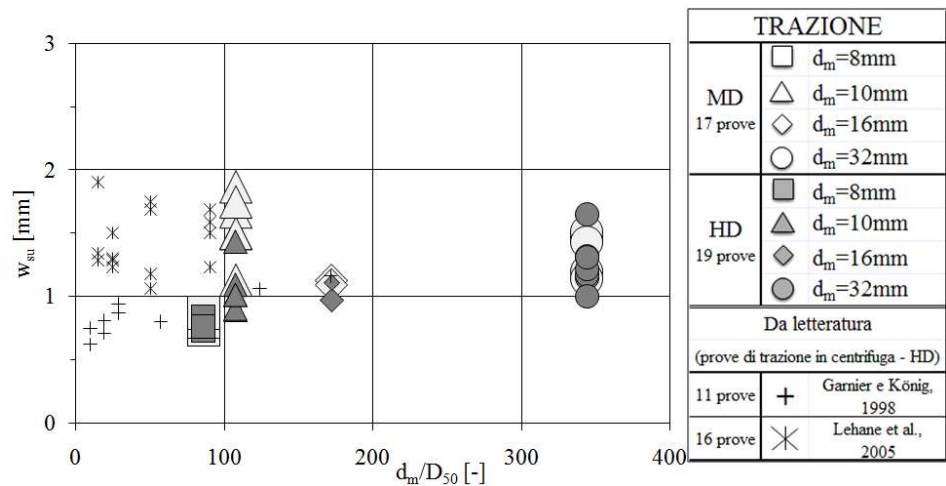
Si osserva pertanto che, a parità di  $D_R$ , lo spostamento all'interfaccia necessario per raggiungere il valore limite di attrito, nelle prove di carico in compressione, è tendenzialmente maggiore di quello mobilitato



imponendo una trazione. Inoltre, per un carico applicato nella stessa direzione, i pali installati in campioni a media densità necessitano di spostamenti maggiori per raggiungere  $\tau_{su}$  di quelli trivellati in sabbia ad alta densità a causa della maggiore rigidità del terreno attorno al fusto.



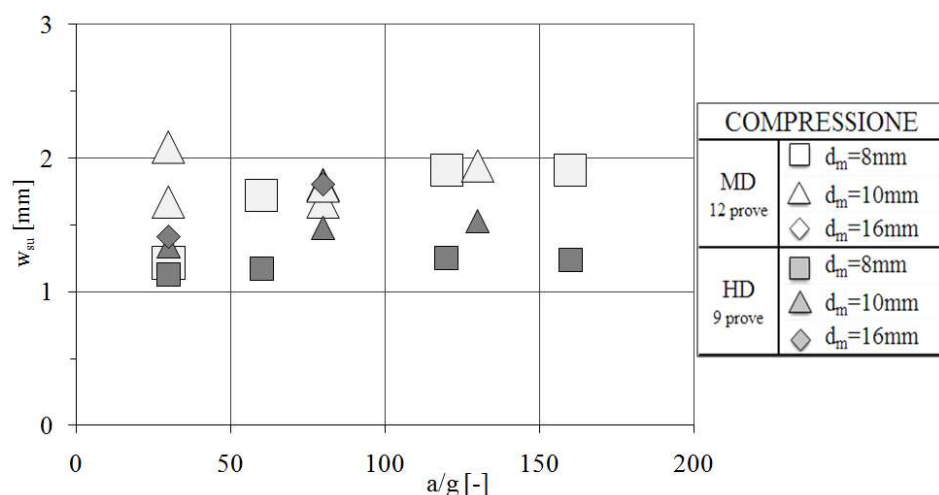
-Figura 2.23a –Effetto scala  $d_m/D_{50}$  su  $w_{su}$  – prove di compressione.



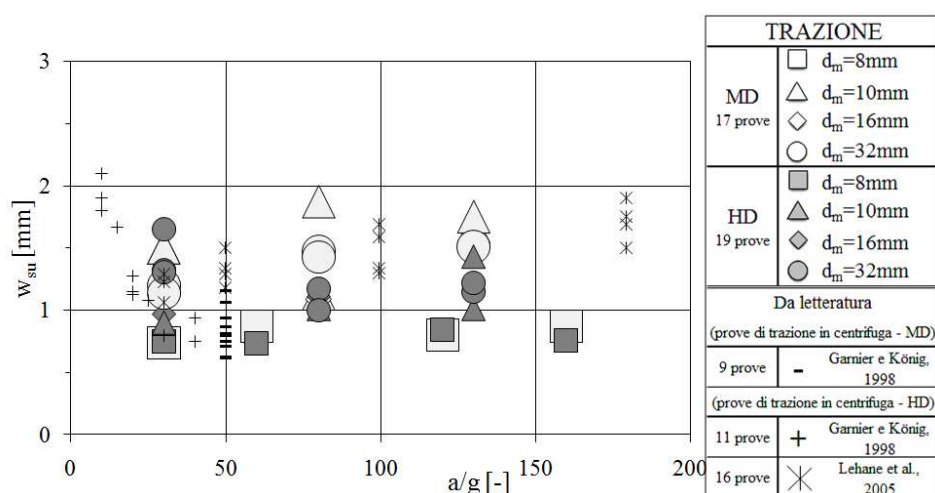
-Figura 2.23b – Effetto scala  $d_m/D_{50}$  su  $w_{su}$  – prove di trazione.

In Figura 2.24 sono mostrati i valori di  $w_{su}$  in funzione del livello di accelerazione imposto a piano campagna: in Figura 2.24a sono diagrammati i  $w_{su}$  relativi a prove di carico in compressione (Tab. 2.2b),

mentre in Figura 2.24b quelli ottenuti per prove di trazione (Tab. 2.2a), dove sono anche riportati i dati rintracciati in letteratura.



-Figura 2.24a – Effetto scala  $a/g$  su  $w_{su}$  – prove di compressione.



-Figura 2.24b – Effetto scala  $a/g$  su  $w_{su}$  – prove di trazione.

Nonostante una certa dispersione, specie nelle prove in trazione più numerose, è possibile osservare un andamento pressoché costante del valore  $w_{su}$  rispetto al livello di accelerazione imposto nella prova: solamente nei dati ottenuti da Garnier e König [1998] per valori di  $a/g$  minori di 20 è riscontrabile la presenza di un certo effetto scala. Tale osservazione equivale anche ad assumere il cedimento  $w_{su}$  indipendente dallo stato tensionale  $\sigma'_{n0}$  agente a fine consolidazione sul fusto del palo

modello, in virtù della diretta proporzionalità (Cap. 1) tra il livello di accelerazione  $a/g$  imposto e la tensione normale  $\sigma'_{n0}$  di calcolo. In Boulon e Foray [1986], Jardine et al. [1993], Foray et al. [1998] il valore di  $w_{su}$  ottenuto da simulazione numerica, prove di interfaccia e modellazione fisica è risultato direttamente proporzionale a  $\sigma'_{n0}$ ; al contrario, dai dati ricavabili da prove di carico su pali trivellati in vera grandezza, presentati da Tan et al. [1998] e Becci et al. [2007], si giunge ad un'opposta conclusione. Considerati i risultati, mostrati nelle Figure 2.24, e alla luce delle evidenze sperimentali documentate in letteratura, sembra lecito ipotizzare che il cedimento  $w_{su}$  sia indipendente dal livello di accelerazione  $a/g$  e quindi da  $\sigma'_{n0}$ . Ulteriori approfondimenti su questo argomento sono presentati al Capitolo 3.

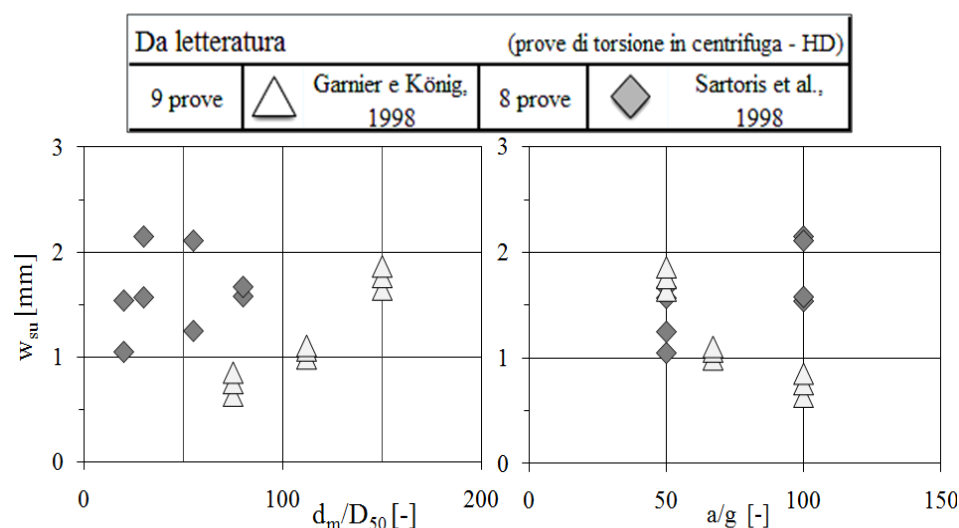
Alcuni ricercatori impiegano i dati di prove di torsione, eseguite in centrifuga su pali rugosi a punta chiusa trivellati, per studiare l'effetto scala sul valore di  $w_{su}$ , a cui si raggiunge il picco attritivo, in funzione del rapporto  $d_m/D_{50}$  e dell'accelerazione:  $w_{su}$  è ricavato dalla misura dell'angolo di torsione  $\Theta$ . In Tabella 2.6 sono raccolti i valori ricavati dalla sperimentazione condotta in Sartoris et al. [1998] mentre in Tabella 2.7 quelli ottenuti da Garnier e König [1998]. I dati sono diagrammati in Figura 2.25 in funzione dei due effetti scala analizzati: nonostante una certa dispersione, è possibile notare che il cedimento è compreso tra 1 mm e 2 mm, in accordo con i dati precedentemente esposti (Figg. 2.23 e 2.24), e che  $w_{su}$  appare sostanzialmente indipendente da  $d_m/D_{50}$  e dal  $a/g$  di prova.

| PROVE DI TORSIONE -<br>PALO MODELLO RUGOSO A PUNTA CHIUSA, TRIVELLATO |       |                  |              |                 |
|---|-------|------------------|--------------|-----------------|
| Sabbia Fontainebleau secca  |       | $D_{50}=0.21$ mm |              | $D_R=80\%-96\%$ |
| $d_m$   | $L_m$ | $a/g$            | $d_m/D_{50}$ | $w_{su}$        |
| [mm]  | [mm]  | [-]              | [-]          | [mm]            |
| 4   | 200   | 50               | 20           | 1.05            |
| 6   | 200   | 50               | 30           | 1.57            |
| 11  | 200   | 50               | 55           | 1.25            |
| 16  | 200   | 50               | 80           | 1.67            |
| 4   | 200   | 100              | 20           | 1.54            |
| 6   | 200   | 100              | 30           | 2.15            |
| 11  | 200   | 100              | 55           | 2.11            |
| 16  | 200   | 100              | 80           | 1.58            |

-Tabella 2.6– Prove di torsione su pali modello rugosi [Sartoris et al., 1998].

| PROVE DI TORSIONE -<br>PALO MODELLO RUGOSO A PUNTA CHIUSA, TRIVELLATO |       |                          |              |            |
|---|-------|--------------------------|--------------|------------|
| Sabbia silicea secca  |       | $D_{50}=0.21 \text{ mm}$ |              | $D_R=90\%$ |
| $d_m$   | $L_m$ | $a/g$                    | $d_m/D_{50}$ | $w_{su}$   |
| [mm]  | [mm]  | [-]                      | [-]          | [mm]       |
| 30  | 120   | 50                       | 150          | 1.64       |
| 30  | 120   | 50                       | 150          | 1.76       |
| 30  | 120   | 50                       | 150          | 1.86       |
| 22.4  | 90    | 67                       | 112          | 0.99       |
| 22.4  | 90    | 67                       | 112          | 1.06       |
| 22.4  | 90    | 67                       | 112          | 1.10       |
| 15  | 60    | 100                      | 75           | 0.63       |
| 15  | 60    | 100                      | 75           | 0.75       |
| 15  | 60    | 100                      | 75           | 0.85       |

-Tabella 2.7 – Prove di torsione su pali modello rugosi [Garnier e König, 1998].



-Figura 2.25 – Effetto scala  $d_m/D_{50}$  e  $a/g$  su  $w_{su}$  – prove di torsione.

Come specificato al Capitolo 1, le leggi di scala sono lo strumento fondamentale per trasportare i risultati ottenuti dalla modellazione fisica alla scala del prototipo; tuttavia quella relativa allo spostamento all'interfaccia non è tuttora nota.

Alcuni autori hanno cercato di risolvere il problema ipotizzando di assumere per il cedimento il medesimo fattore di scala applicato alle lunghezze: gli stessi Garnier e König [1998] ritengono di ottenere una

corretta stima di  $w_{su}$ , relativo al prototipo, moltiplicando per il fattore di scala  $N$  ( $N=a/g$ = fattore di scala dell'accelerazione) il valore ottenuto nel modello. Al contrario Sartoris et al. [1998], facendo riferimento ai dati ottenuti da Balachowski [1995] relativi a pali modello rugosi e trivellati, evidenzia la sostanzialmente incongruenza dell'approccio, in quanto gli spostamenti all'interfaccia ottenibili per il prototipo risultano fisicamente eccessivi.

A tal proposito si cerca di stimare il valore rappresentativi di  $w_{su}$  in funzione della snellezza del palo,  $L/D$ , utilizzando dati di letteratura relativi a prove di carico in compressione e trazione su pali trivellati reali, gettati in opera in terreni granulari a prevalente componente sabbiosa. I dati, riassunti in Tabella 2.8, sono suddivisi in funzione del grado di addensamento del deposito: in Tabella 2.8a si riportano le informazioni relative ai siti con densità relativa media (MD), mentre in Tabella 2.8b quelle ottenute da siti ad alto addensamento (HD).

I valori sperimentali sono mostrati in Figura 2.26 per i siti granulari a media densità e in Figura 2.27 per quelli ad alta densità relativa; nelle stesse figure sono inoltre riportati gli spostamenti in scala modello ottenuti dalla sperimentazione in centrifuga (Tabb. 2.2a e 2.2b) sui pali rugosi trivellati.

| PROVE DI CARICO SU PALI TRIVELLATI IN VERA GRANDEZZA<br>SITI PREVALENTEMENTE SABBIOSI A Media Densità |      |        |     |          |                         |
|---|------|--------|-----|----------|-------------------------|
| D   | L    | Carico | L/D | $w_{su}$ | Bibliografia            |
| [mm]  | [mm] | T/C*   | [-] | [mm]     |                         |
| 101   | 1500 | T      | 15  | 8        | Ismael N. F., 1989      |
| 140   | 1750 | T      | 13  | 10       | Krabbenhoft et al. 2006 |
| 140   | 2150 | T      | 15  | 8        |                         |
| 140   | 2960 | T      | 21  | 12       |                         |
| 140   | 3050 | T      | 22  | 11       |                         |
| 140   | 3980 | T      | 28  | 10       |                         |
| 140   | 4000 | T      | 29  | 12       |                         |
| 140   | 4850 | T      | 35  | 15       |                         |
| 140   | 5000 | T      | 36  | 12       |                         |
| 140   | 3400 | T      | 24  | 10       |                         |
| 140   | 6000 | T      | 43  | 22       |                         |
| 152   | 1500 | T      | 10  | 4.6      | Kulhawy et al. 1979     |
| 152   | 1500 | T      | 10  | 6.1      |                         |
| 140   | 3210 | T      | 23  | 14       | Krabbenhoft et al. 2008 |
| 250   | 5920 | T      | 24  | 13       |                         |

| PROVE DI CARICO SU PALI TRIVELLATI IN VERA GRANDEZZA<br>SITI PREVALENTEMENTE SABBIOSI A Media Densità |       |        |     |                 |                                    |
|---|-------|--------|-----|-----------------|------------------------------------|
| D   | L     | Carico | L/D | W <sub>su</sub> | Bibliografia                       |
| [mm]  | [mm]  | T/C*   | [-] | [mm]            |                                    |
| 380   | 12200 | T      | 32  | 15.24           | Sowa 1970                          |
| 530   | 12200 | T      | 23  | 15.24           |                                    |
| 405   | 3350  | T      | 8   | 12.7            |                                    |
| 405   | 3650  | T      | 9   | 12.7            |                                    |
| 405   | 3960  | T      | 10  | 12.7            |                                    |
| 405   | 4270  | T      | 11  | 12.7            |                                    |
| 490   | 3048  | T      | 6   | 10.16           |                                    |
| 910   | 2900  | T      | 3   | 12.7            |                                    |
| 910   | 2740  | T      | 3   | 25.4            |                                    |
| 910   | 3048  | T      | 3   | 7.62            |                                    |
| 457   | 3048  | T      | 7   | 25.4            | Tucker 1987                        |
| 488   | 3048  | T      | 6   | 7.6             |                                    |
| 488   | 3048  | T      | 6   | 11.4            |                                    |
| 488   | 3048  | T      | 6   | 7.6             |                                    |
| 488   | 4572  | T      | 9   | 13.2            |                                    |
| 488   | 4572  | T      | 9   | 12.4            |                                    |
| 466   | 4450  | T      | 10  | 13.0            |                                    |
| 488   | 3048  | T      | 6   | 10.2            |                                    |
| 488   | 3048  | T      | 6   | 6.4             |                                    |
| 488   | 3048  | T      | 6   | 10.2            |                                    |
| 460   | 3048  | T      | 7   | 2.5             |                                    |
| 460   | 3048  | T      | 7   | 6.4             |                                    |
| 460   | 3048  | T      | 7   | 16.5            |                                    |
| 460   | 3048  | T      | 7   | 5.1             |                                    |
| 482   | 2652  | T      | 6   | 10.2            |                                    |
| 482   | 2987  | T      | 6   | 13.2            |                                    |
| 1503  | 2987  | T      | 2   | 6.9             |                                    |
| 350   | 8000  | T      | 23  | 24.0            |                                    |
| 1000  | 9370  | T      | 9   | 23              | Fujioka T. e Yamada K.,<br>1997    |
| 390   | 9590  | C      | 25  | 19.5            | Huybrechts N., Maertens J.<br>2008 |
| 410   | 9450  | C      | 23  | 24.60           |                                    |
| 446   | 9510  | C      | 21  | 13.38           |                                    |
| 446   | 9570  | C      | 21  | 15.61           |                                    |
| 550   | 9200  | C      | 17  | 27.50           |                                    |
| 610   | 20000 | C      | 33  | 22              | Tan et al. 1998                    |
| 900   | 29000 | C      | 32  | 10              |                                    |
| 1200  | 11000 | C      | 9   | 28.8            | Yasufuku et al. 1997               |
| 1200  | 16500 | C      | 14  | 16.8            |                                    |

| PROVE DI CARICO SU PALI TRIVELLATI IN VERA GRANDEZZA<br>SITI PREVALENTEMENTE SABBIOSI A Media Densità |       |        |     |                 |                                    |
|---|-------|--------|-----|-----------------|------------------------------------|
| D   | L     | Carico | L/D | w <sub>su</sub> | Bibliografia                       |
| [mm]  | [mm]  | T/C*   | [-] | [mm]            |                                    |
| 1200  | 22000 | C      | 18  | 26.4            | Yasufuku et al. 1997<br>(continua) |
| 1200  | 30500 | C      | 25  | 25.2            |                                    |
| 1200  | 39400 | C      | 33  | 24              |                                    |

\* T = carico assiale di trazione; C = carico assiale di compressione

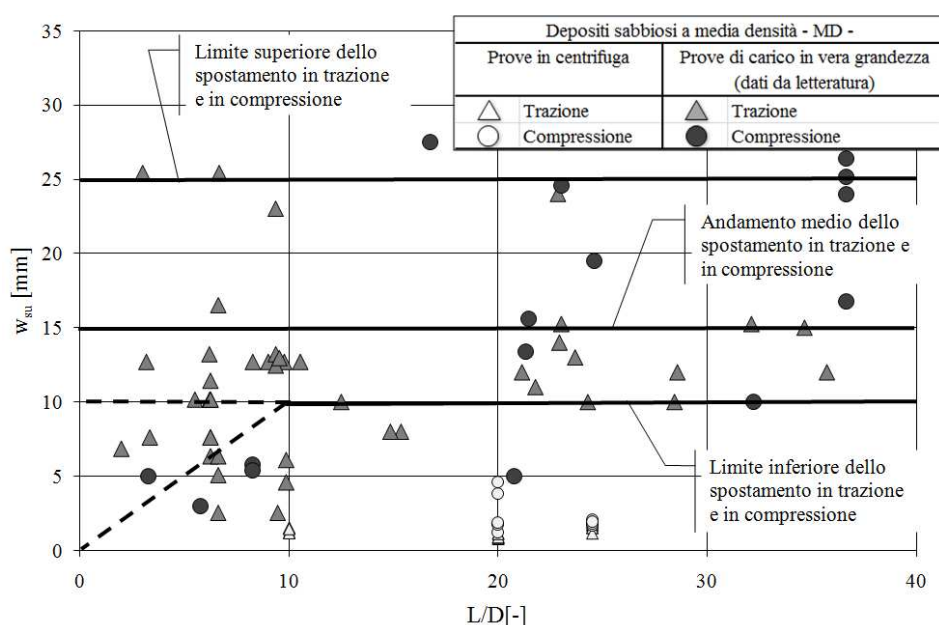
-Tabella 2.8a – Prove di carico in trazione e compressione su pali trivellati in vera grandezza – dati da letteratura per siti a media densità.

| PROVE DI CARICO SU PALI TRIVELLATI IN VERA GRANDEZZA<br>SITI PREVALENTEMENTE SABBIOSI AD Alta Densità |       |        |     |                 |                                |
|---|-------|--------|-----|-----------------|--------------------------------|
| D   | L     | Carico | L/D | w <sub>su</sub> | Bibliografia                   |
| [mm]  | [mm]  | T/C*   | [-] | [mm]            |                                |
| 152   | 1500  | T      | 10  | 7.4             | Kulhawy et al., 1979           |
| 152   | 1500  | T      | 10  | 6.1             |                                |
| 460   | 4511  | T      | 10  | 3.1             | Tucker 1987                    |
| 460   | 3353  | T      | 7   | 1.4             |                                |
| 460   | 3353  | T      | 7   | 1.8             |                                |
| 460   | 5486  | T      | 12  | 1.2             |                                |
| 460   | 3048  | T      | 7   | 0.9             |                                |
| 460   | 1920  | T      | 4   | 4.9             |                                |
| 460   | 2987  | T      | 6   | 2.5             |                                |
| 460   | 2865  | T      | 6   | 3.6             |                                |
| 460   | 3048  | T      | 7   | 2.4             |                                |
| 460   | 6096  | T      | 13  | 2.6             |                                |
| 460   | 3658  | T      | 8   | 3.3             |                                |
| 480   | 3780  | T      | 8   | 12.5            |                                |
| 490   | 4570  | T      | 9   | 11.7            |                                |
| 480   | 2650  | T      | 6   | 10.0            |                                |
| 533   | 7000  | T      | 13  | 8.3             |                                |
| 870   | 10360 | T      | 12  | 12.5            |                                |
| 520   | 7000  | T      | 13  | 13.0            |                                |
| 460   | 3048  | T      | 7   | 7.0             |                                |
| 1283  | 1701  | T      | 1   | 5.1             |                                |
| 690   | 4600  | T      | 7   | 7.5             | Kostantinidis et al., 1987     |
| 670   | 3100  | T      | 5   | 7.5             |                                |
| 1600  | 44400 | T      | 28  | 1.6             | Rocher-Lacoste et al.,<br>2008 |
| 1600  | 41300 | T      | 26  | 1.4             |                                |
| 1600  | 38100 | T      | 24  | 5.2             |                                |
| 1600  | 35000 | T      | 22  | 2.7             |                                |

| PROVE DI CARICO SU PALI TRIVELLATI IN VERA GRANDEZZA<br>SITI PREVALENTEMENTE SABBIOSI AD Alta Densità |       |        |     |          | Bibliografia          |
|---|-------|--------|-----|----------|-----------------------|
| D   | L     | Carico | L/D | $w_{su}$ |                       |
| [mm]  | [mm]  | T/C*   | [-] | [mm]     |                       |
| 900   | 5500  | C      | 6   | 9.2      | Tan et al., 1998      |
| 610   | 20000 | C      | 33  | 14.0     |                       |
| 750   | 18600 | C      | 25  | 13.0     |                       |
| 1050  | 33000 | C      | 31  | 14.0     |                       |
| 1500  | 3850  | C      | 3   | 8        | Collotta et al., 1989 |
| 1500  | 2325  | C      | 2   | 9        |                       |
| 1500  | 5775  | C      | 4   | 10       |                       |

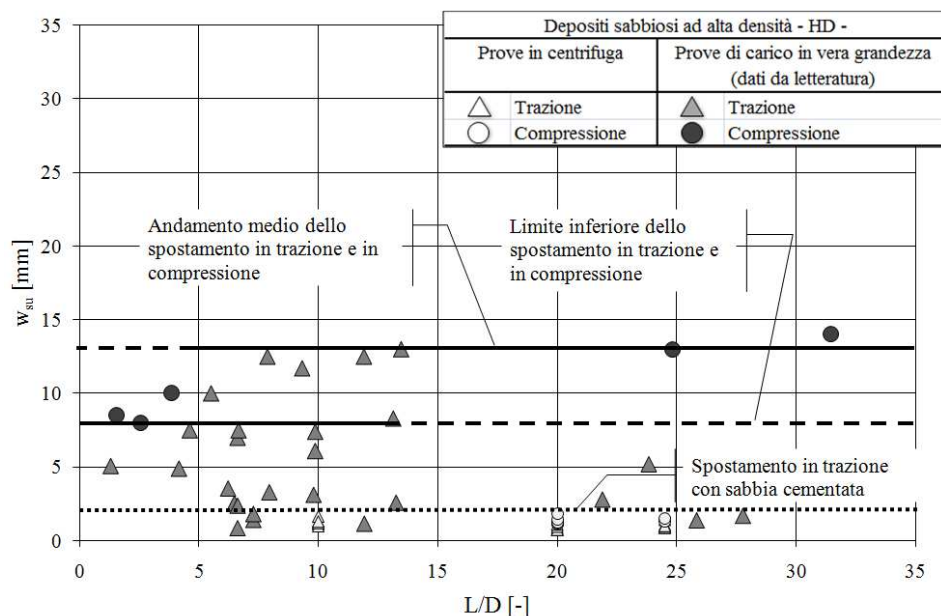
\* T = carico assiale di trazione; C = carico assiale di compressione

-Tabella 2.8b – Prove di carico in trazione e compressione su pali trivellati in vera grandezza – dati da letteratura per siti ad alta densità.



-Figura 2.26 – Spostamenti all'interfaccia  $w_{su}$  da prove di carico su pali trivellati in vera grandezza e in centrifuga, sottoposti a sforzi assiali di compressione e di trazione – terreni a media densità MD.





-Figura 2.27 – Spostamenti all'interfaccia  $w_{su}$  da prove di carico su pali trivellati in vera grandezza e in centrifuga, sottoposti a sforzi assiali di compressione e di trazione – terreni ad alta densità HD.

In Figura 2.26 sono riportati i cedimenti  $w_{su}$  raccolti in Tabella 2.8a, relativi a siti a media densità, con prove di carico in trazione in compressione. E' possibile definire un involucro medio (linea continua) che ben rappresenta l'andamento di  $w_{su}$  in prove di trazione, mentre quelli in compressione si mostrano maggiormente dispersi. Sono quindi indicati due andamenti limite, uno inferiore, per un cedimento di circa 10 mm, e uno superiore, prossimo a 25 mm: le prove raccolte sono sostanzialmente comprese entro questi due confini (linee tratteggiate). Per snellezze  $L/D < 10$ , il palo si presenta particolarmente tozzo e i dati più dispersi, probabilmente per un maggiore disturbo indotto nel terreno superficiale dalla realizzazione di un palo corto.

La dispersione dei dati, specie in compressione, è imputabile a diverse cause: innanzitutto la forte eterogeneità dei siti reali, la geometria non regolare dei pali gettati in opera (nelle Tab. 2.8a e 2.8b le dimensioni del palo sono nella maggior parte dei casi quelle nominali stabilite in fase progettuale), differenti modalità esecutive ed infine possibili errori in fase di esecuzione della prova di carico e di interpretazione dei risultati. La quota di falda, diversa nelle varie fonti bibliografiche reperite, non sembra avere invece una ripercussione sistematica sul valore di  $w_{su}$ .

Un numero più limitato di dati sperimentali sono rintracciati per i pali trivellati in depositi principalmente sabbiosi ad alta densità relativa (Tab.

2.8b), diagrammati per entrambi i carichi assiali in Figura 2.27. I cedimenti  $w_{su}$  riportati appaiono compresi tra 7 mm e 13 mm per entrambi i carichi assiali; il valore di  $w_{su}$  si abbatte fino a circa 2 mm – 3 mm per prove di trazione svolte su pali trivellati in sabbie parzialmente cementate.

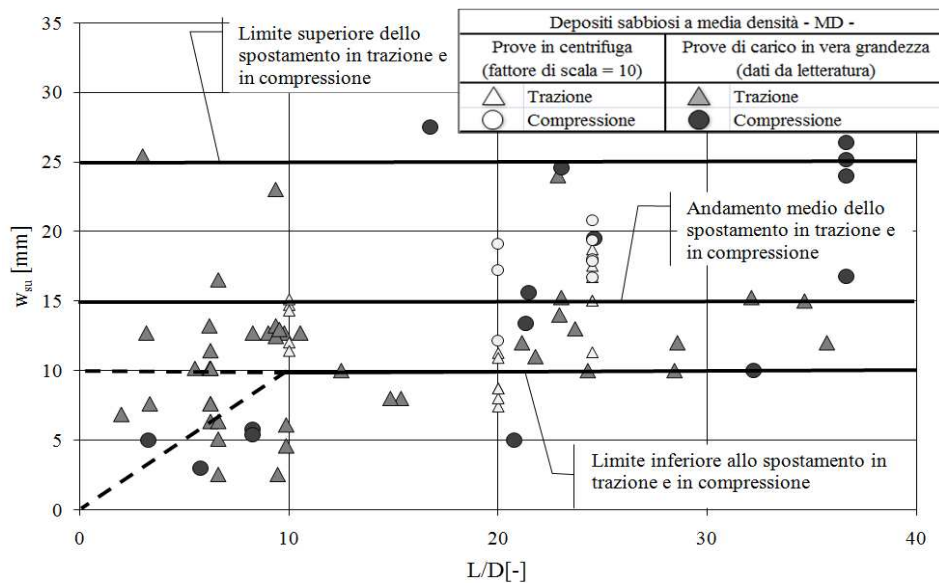
I valori di  $w_{su}$  registrati dalle prove di carico in vera grandezza, confermano che  $w_{su}$  in depositi a MD è generalmente maggiore che in depositi sabbiosi a HD, come osservato qualitativamente dall'interpretazione delle prove condotte in centrifuga geotecnica.

Oltre ai dati raccolti nelle Tabelle 2.8, relativi a prove in vera grandezza, alcuni riferimenti di massima sui valori medi, che si potrebbero ottenere da prove in trazione o in compressione al picco  $\tau_{su}$ , sono individuati da Kulhawy [2004]: per depositi a media densità relativa un valore caratteristico di  $w_{su}$  per prove in trazione è pari a circa 13 mm, mentre per prove in compressione il valore rappresentativo è circa 25 mm – 30 mm, spostamenti limite in buon accordo con i risultati dell'interpretazione mostrati nella Figura 2.26.

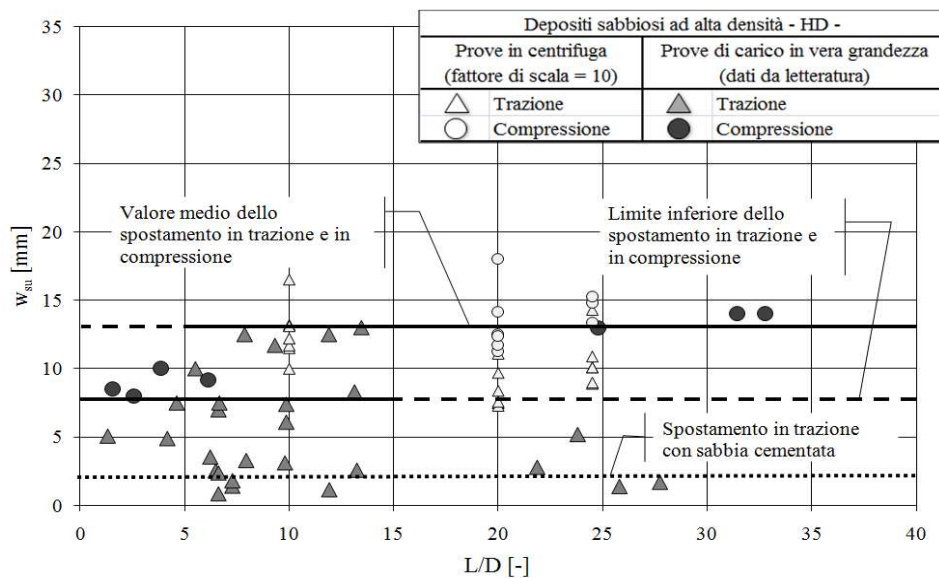
I dati ottenuti dalla sperimentazione in centrifuga si attestano, in scala modello, attorno a 1 mm - 2 mm (Figg. 2.26 e 2.27): appare quindi evidente che il fattore di scala  $N$  dello spostamento debba essere diverso da 1 ( $w_{su|modello} \neq w_{su|prototipo}$ ). Dai valori limite desunti dalle prove di carico in vera grandezza (Figg. 2.26 e 2.27) si deduce inoltre che un fattore di scala pari a quello comunemente applicato alle lunghezze ( $N = a/g$ ) sia altrettanto inadeguato ( $w_{su|prototipo} \neq N w_{su|modello}$ ): applicandolo si stimerebbero per il prototipo, in modo indipendente dal grado di addensamento, spostamenti fisicamente non accettabili che possono arrivare anche a 230 mm.

Dal confronto tra i valori di spostamento ottenuti dall'analisi delle prove in vera grandezza e quelli ricavati dalla sperimentazione in centrifuga è possibile ipotizzare un fattore di scala per  $w_{su}$  pari a 10, indipendente dalla direzione del carico, dal livello di accelerazione imposto nella simulazione e, in prima istanza, anche dalla densità relativa. Il risultato dell'assunzione fatta è mostrato nelle Figure 2.28, per le prove a media densità, e in Figura 2.29, per quelle ad alta densità. I punti rappresentanti i  $w_{su}$  delle prove in centrifuga ben si dispongono attorno ai valori medi o limite individuati in ciascuna situazione.

Il significato fisico di un rapporto di scala non dipendente dal livello di accelerazione utilizzato per la simulazione in centrifuga non è tuttavia chiaro e necessita di ulteriori approfondimenti.



-Figura 2.28– Spostamenti all'interfaccia  $w_{su}$  da prove di carico su pali trivellati in vera grandezza e in centrifuga (fattore di scala=10), sottoposti a sforzi assiali di compressione e di trazione – terreni ad alta densità HD.



-Figura 2.29– Spostamenti all'interfaccia  $w_{su}$  da prove di carico su pali trivellati in vera grandezza e in centrifuga (fattore di scala=10), sottoposti a sforzi assiali di compressione e di trazione – terreni ad alta densità HD.

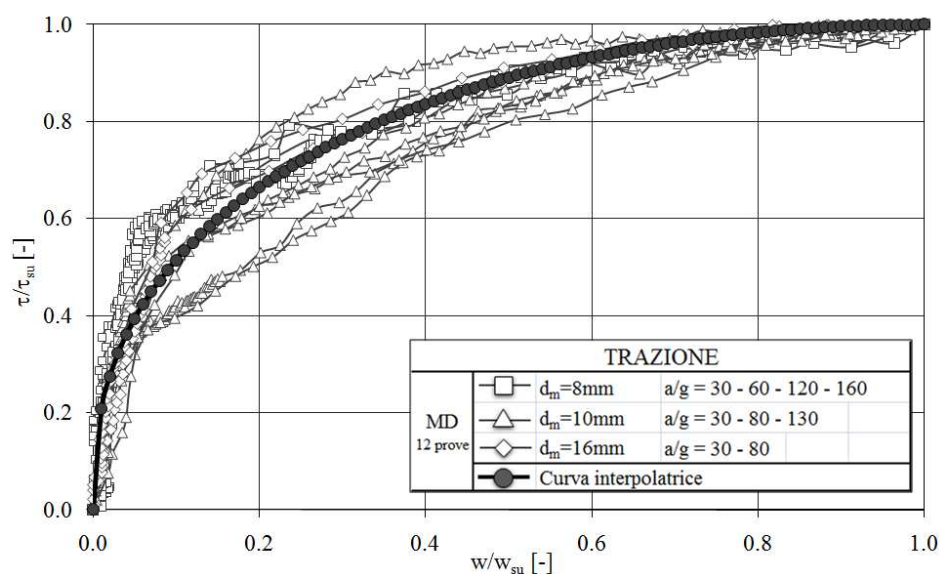
## 2.7 CURVE DI MOBILITAZIONE DELL'ATTRITO LATERALE

Le curve di sviluppo delle tensioni tangenziali  $\tau_s$ -  $w$ , ottenute dalle prove di modellazione fisica in centrifuga, sono normalizzate allo scopo di ricavare le *leggi di mobilitazione dell'attrito laterale* sul fusto di pali rugosi trivellati in sabbia.

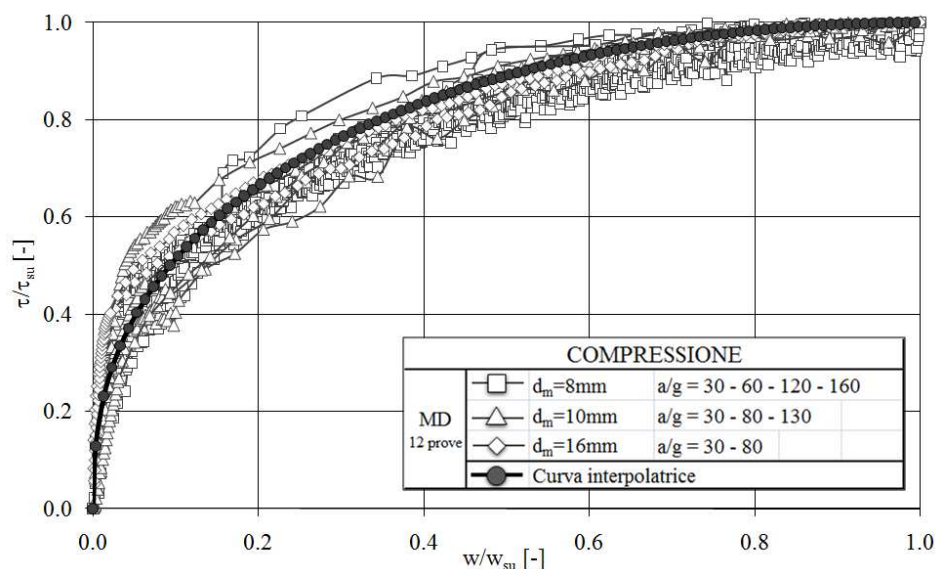
Le tensioni tangenziali  $\tau_s$  sono normalizzate rispetto al loro valore limite  $\tau_{su}$ , non essendo noto lo stato tensionale normale che agisce in ogni istante in direzione radiale al palo durante la prova; parallelamente i cedimenti del palo sono normalizzati rispetto al valore  $w_{su}$  che compete a  $\tau_{su}$ .

Sono impiegati per l'analisi solamente i dati relativi alle tensioni tangenziali medie calcolate per i pali modello strumentati.

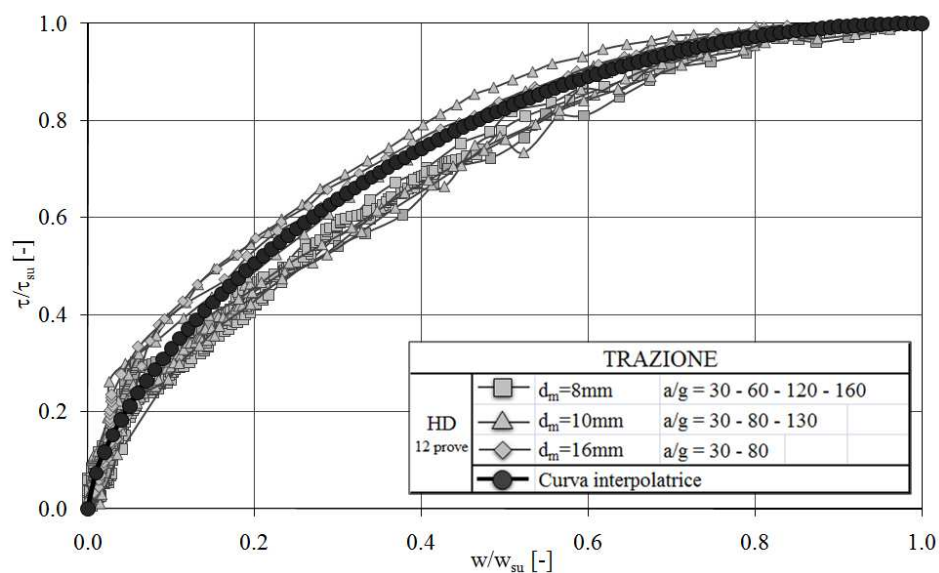
In Figura 2.30 sono mostrate le curve di trasferimento dell'attrito laterale per pali modello installati in campioni di sabbia FF a media densità relativa (MD), riportando, per chiarezza grafica, in Figura 2.30a quelle ottenute con carico assiale di trazione e in Figura 2.30b quelle con carico assiale di compressione. Analogamente, per i campioni sabbiosi depositi ad alta densità relativa (HD), le curve di mobilitazione delle tensioni tangenziali sono rappresentate in Figura 2.31a per i pali modello testati con carichi assiali di trazione e in Figura 2.31b per quelli caricati assialmente in compressione.



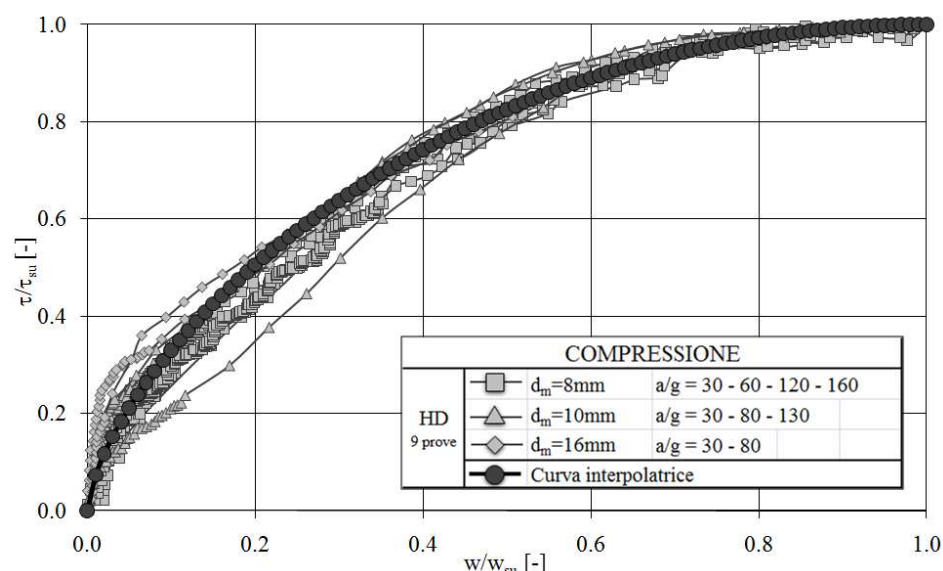
-Figura 2.30a – Curve di mobilitazione delle tensioni tangenziali di pali modello trivellati in sabbia FF secca deposta a media densità (MD) e caricati assialmente in trazione; curva interpolatrice a MD.



-Figura 2.30b – Curve di mobilitazione delle tensioni tangenziali di pali modello trivellati in sabbia FF secca deposta a media densità (MD) e caricati assialmente in compressione; curva interpolatrice a MD.



-Figura 2.31a – Curve di mobilitazione delle tensioni tangenziali di pali modello trivellati in sabbia FF secca deposta ad alta densità (HD) e caricati assialmente in trazione; curva interpolatrice a HD.



-Figura 2.31b– Curve di mobilitazione delle tensioni tangenziali di pali modello trivellati in sabbia FF secca deposta ad alta densità (HD) e caricati assialmente in compressione; curva interpolatrice a HD.

Dagli andamenti mostrati nelle Figure 2.30a e 2.30b, per i campioni a media densità, e nelle Figura 2.31a e 2.31b, per quelli ad alta densità, è possibile ricavare una curva di involucro, la cui espressione analitica generale è:

$$\frac{\tau_s}{\tau_{su}} = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{w}{w_{su}} \right)^2 \right]^{\frac{1}{a}} \quad [-] \quad (2.19)$$

Con:

$a= 2.5$  per le prove a media densità

$a= 1.5$  per le prove ad alta densità

Dai risultati ottenuti, si riscontra che la curva di mobilitazione dell'attrito laterale su un palo idealmente trivellato in sabbia secca FF è dipendente dalla densità relativa, dipendenza espressa dalla variazione del parametro  $a$  della (2.19), mentre non appare influenzata in modo significativo dalla direzione del carico assiale, esternamente applicato.

La conoscenza di relazioni semi-empiriche, come la (2.19), permette di determinare il valore della tensione tangenziale  $\tau_s$  al progredire del cedimento del palo, per valori inferiori a quello limite  $\tau_{su}$ . Una progettazione agli stati limite di servizio (SLS), può portare alla necessità di limitare i cedimenti dei pali di fondazione: in tale situazione, la

conoscenza della legge di mobilitazione dell'attrito laterale permette di quantificare, in funzione del cedimento ammissibile, la quota parte di attrito che si svilupperà sul palo.





## **CAPITOLO 3**

---

### ***PROVE DI INTERFACCIA:***

### ***TAGLIO DIRETTO A RIGIDEZZA NORMALE IMPOSTA***

---

#### ***3.1 INTRODUZIONE***

L'interazione tra terreno e struttura è un fenomeno complesso controllato da numerosi fattori riguardanti, ed esempio, le caratteristiche del terreno costituente il deposito in cui l'opera è realizzata, le peculiarità proprie della struttura e la sua modalità esecutiva.

Molte opere geotecniche, tra cui i pali di fondazione, i micropali, i tiranti di ancoraggio, le terre armate e i geosintetici, sfruttano un meccanismo essenzialmente attritivo per mobilitare la loro resistenza. A causa del gran numero di fattori che controllano tale meccanismo, sono comunemente utilizzati per la progettazione corrente approcci essenzialmente empirici basati sui risultati ricavati da back-analysis di prove in vera grandezza.

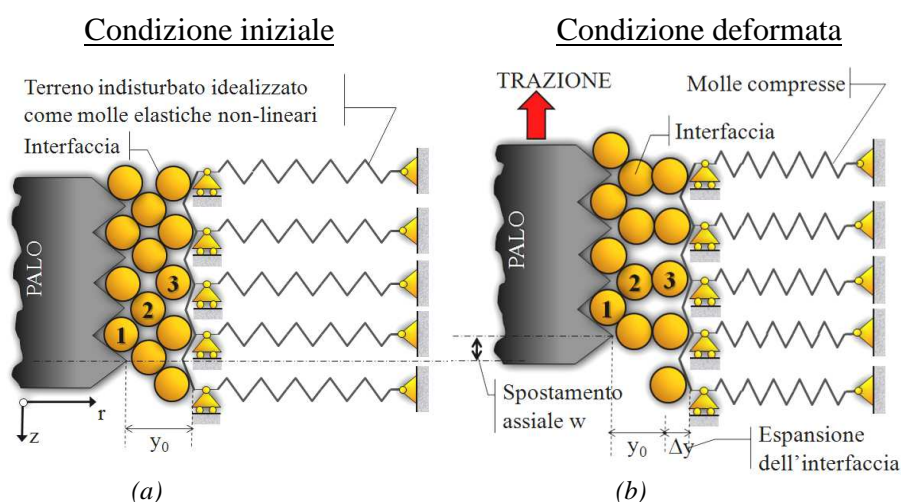
Per ricercare un approccio alternativo, più razionale e probabilmente più economico, è necessario approfondire la conoscenza dei fattori che controllano la formazione delle tensioni tangenziali, cercando di estendere i risultati ottenuti al campo applicativo della progettazione dei pali trivellati in terreni granulari.

Nell'ultimo secolo, studi specifici condotti con tecniche di visualizzazione (fotoelasticità, raggi x, GEO-PIV) hanno documentato che la zona in cui si sviluppa la resistenza attritiva è molto limitata ed interessa una ristretta porzione di terreno compresa tra la superficie della struttura e il deposito granulare indisturbato [Robinsky e Morrison 1964; Yoshimi e Kishida 1981 e 1981a; Scarpelli e Wood 1982; Boulon 1988; Hoteit 1990; Paikowsky et al. 1996; Oda e Kazama 1998; Alshibli e Hasan 2008; DeJong e Westgate 2008 e 2009]. Il comportamento tenso-deformativo di questa ristretta fascia di terreno, che prende il nome di

*interfaccia*, controlla la mobilitazione dell'attrito e quindi la resistenza del terreno. Come illustrato al Capitolo 2, il suo spessore è variabile in funzione delle condizioni al contorno ma un valore medio pari a  $10D_{50}$  è comunemente accettato per le superfici rugose a contatto con sabbia.

Il primo a proporre un modello interpretativo, che fosse sia qualitativo che quantitativo, della mobilitazione delle tensioni tangenziali all'interfaccia su elementi di ancoraggio installati in un terreno sabbioso è Wernick [1978].

Il modello di Wernick, mostrato in Figura 3.1, risulta in generale applicabile a tutti gli elementi strutturali che mobilitano la resistenza del terreno per attrito.



-Figura 3.1 – Modello di Wernick [1978]: condizione iniziale (a) e condizione deformata (b) dell'interfaccia.

Lo schema riportato in Figura 3.1a rappresenta una porzione di palo rugoso, installato in sabbia: la zona di interfaccia di spessore  $y_0$  è distinta dalla massa di terreno circostante. A seguito dell'applicazione di una forza assiale di trazione  $F$  (Fig. 3.1b) il palo subisce uno spostamento  $w$  e un riassetto dei grani di sabbia presenti nell'interfaccia, che modifica il suo spessore. Il terreno oltre la banda di taglio è schematizzato da una serie di molle a comportamento elastico non-lineare, che, conseguentemente alla deformazione dell'interfaccia, reagiscono restituendo una tensione di confinamento dipendente dalla loro rigidità.

In particolare, come sarà approfondito nel seguito, quando la superficie del palo è ad alta rugosità normalizzata, l'interfaccia ha comportamento dilatante e reagisce allo scorrimento del palo aumentando di volume e caricando le molle di terreno indisturbato. Per garantire la congruenza degli spostamenti orizzontali, queste ultime rispondono con un incremento di tensione normale, proporzionale alla loro rigidità e allo spostamento radiale  $\Delta y$ , che produce un confinamento all'espansione della banda di taglio: tale effetto prende il nome di *dilatanza impedita* [Boulon e Foray 1986; Ooi e Carter 1987; Boulon 1988; Hoteit 1990; Al Douri e Poulos 1991; Fioravante et al. 1999].

Conseguentemente, le tensioni tangenziali  $\tau_s$  che si mobilitano sul palo aumentano a causa di  $\Delta\sigma'_n$ , secondo una equazione del tipo:

$$\tau_s = (\sigma'_{n0} + \Delta\sigma'_n) \tan \delta' \quad [FL^{-2}] \quad (3.1)$$

con

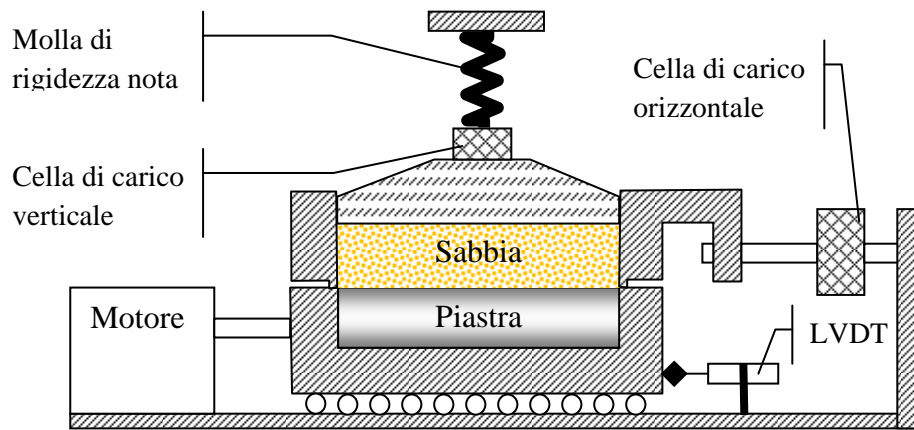
$\sigma'_{n0}$  = tensione normale alla superficie dell'inclusione dopo l'installazione

$\Delta\sigma'_n$  = incremento tensionale dovuto alla dilatanza impedita

$\delta'$  = angolo di attrito terreno inclusione

Il modello di Wernick [1978], che ben si presta ad interpretare il meccanismo di mobilitazione delle tensioni tangenziali sul fusto del palo, è riproducibile in laboratorio attraverso l'apparecchiatura di taglio diretto a rigidità normale imposta (Direct Shear Constant Normal Stiffness – *DS-CNS*) il cui schema è riportato in Figura 3.2.

Negli ultimi decenni l'apparecchiatura DS-CNS si è diffusa come utile e versatile strumento per lo studio del meccanismo di attrito [Ferrero 1996; Troni 1997; Fioravante et al. 1999; Mortara 2001; Porcino et al. 2003; Lings e Dietz 2005; Airey e Kelly 2008; DeJong e Westgate 2008 e 2009], con particolare riferimento al comportamento dei pali di fondazione [Jhonston et al. 1987; Balachowski 1995; Tabucanon et al. 1995; Foray et al. 1998; Reddy et al. 2000; Sarri 2001; Fioravante 2002; Garnier et al. 2002; Lehane e White 2005; Lehane et al. 2005; Balachowski 2006].



-Figura 3.2– Schema dell'apparecchiatura DS-CNS per prove di interfaccia.

In generale, la prova di taglio diretto è usata per simulare correttamente la fase di taglio prodotta dallo scorrimento relativo tra il palo caricato assialmente e il terreno sabbioso circostante. Sostituendo una delle semiscatole con una piastra metallica rigida di rugosità variabile è possibile riprodurre diverse asperità dei fusti dei pali reali. Infine, imponendo esternamente al campione una rigidezza  $k$ , si simulano le molle che nel modello di Wernick [1978] rappresentano il terreno circostante l'inclusione.

Dai risultati sperimentali presenti in letteratura è emerso che la densità relativa, la tensione normale iniziale, la rigidezza imposta, la rugosità superficiale del fusto o dell'inclusione rigida e le caratteristiche del terreno sabbioso testato sono fattori che governano il comportamento dell'interfaccia e di conseguenza la mobilitazione dell'attrito.

In particolare si è osservato che:

- all'aumentare della densità relativa del deposito sabbioso la resistenza aumenta e si riscontra un comportamento dell'interfaccia che è dilatante per sabbie dense e contraente per sabbie sciolte [Wernick 1978; Schlosser e Guilloux 1979, 1981; Balachowski 1995; Lehane e White 2005; Tabucanon et al. 2005; Dumitrescu et al. 2009];
- un incremento della pressione di confinamento inibisce l'aumento di volume dell'interfaccia e impedisce che le molle di terreno indisturbato entrino in carico: passando da pressioni  $\sigma'_{n0}$  dell'ordine di 0.1 MPa a 3 MPa, il comportamento della sabbia nella banda di taglio da dilatante diventa contraente e, di conseguenza, l'incremento tensionale  $\Delta\sigma'_n$  si riduce [Bolton 1986];

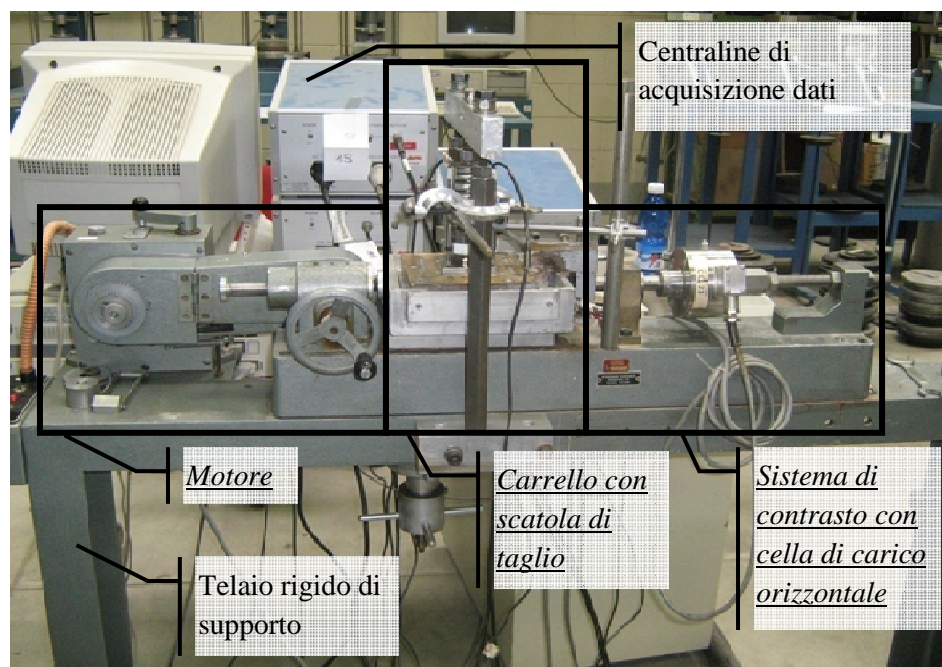
- un aumento della rugosità superficiale dell'inclusione,  $R_t$ , produce un incremento dell'attrito che si sviluppa sulla superficie, a parità del  $D_{50}$  della sabbia testata. Come anticipato al Capitolo 2, Uesugi e Kishida [1986] introducono il parametro rugosità normalizzata,  $R_n$ , per rappresentare contemporaneamente l'influenza della rugosità dell'inclusione e del  $D_{50}$  della sabbia utilizzata sull'attrito generato;
- l'angolo di attrito  $\delta'$  che si mobilita tra inclusione rigida e sabbia è funzione della rugosità normalizzata e tende a crescere per superfici aventi  $R_n$  bassa e intermedia [Uesugi et al. 1986; Tabucanon et al. 1995; Fioravante et al. 1999; Dietz 2000; Sarri 2001; Garnier 2002; Porcino et al. 2003; Lings e Dietz 2005]. Per superfici altamente rugose,  $\delta'$  è costante e tende al suo valore massimo definito dall'angolo di attrito della sabbia  $\phi'$ , sviluppato nelle stesse condizioni al contorno [Tatsuoka 1985; Uesugi e Kishida 1986; Porcino et al. 2003; Lings e Dietz 2005].

Con lo scopo di analizzare gli effetti che la densità relativa  $D_R$ , la tensione di confinamento  $\sigma'_{n0}$  e la rigidezza normale  $k$  producono sullo sviluppo dell'attrito di un elemento rigido a contatto con la sabbia FF, sono eseguite circa 60 prove DS-CNS. I dati ottenuti sono integrati dai risultati di ulteriori 90 prove eseguite negli anni precedenti, su sabbia secca FF a contatto con piastre lisce e mediamente rugose [Ferrero 1996; Troni 1997; Fioravante et al. 1999; Mortara 2001; Sarri 2001; Porcino et al. 2003].

## **3.2 PROVA DI TAGLIO DIRETTO A RIGIDEZZA NORMALE IMPOSTA**

### **3.2.1 APPARECCHIATURA DI PROVA**

L'apparecchiatura utilizzata, mostrata in Figura 3.3, è un adattamento della comune macchina di taglio diretto opportunamente modificata per permettere di applicare al campione una rigidezza normale  $k$  di entità nota e costante durante tutta la prova.

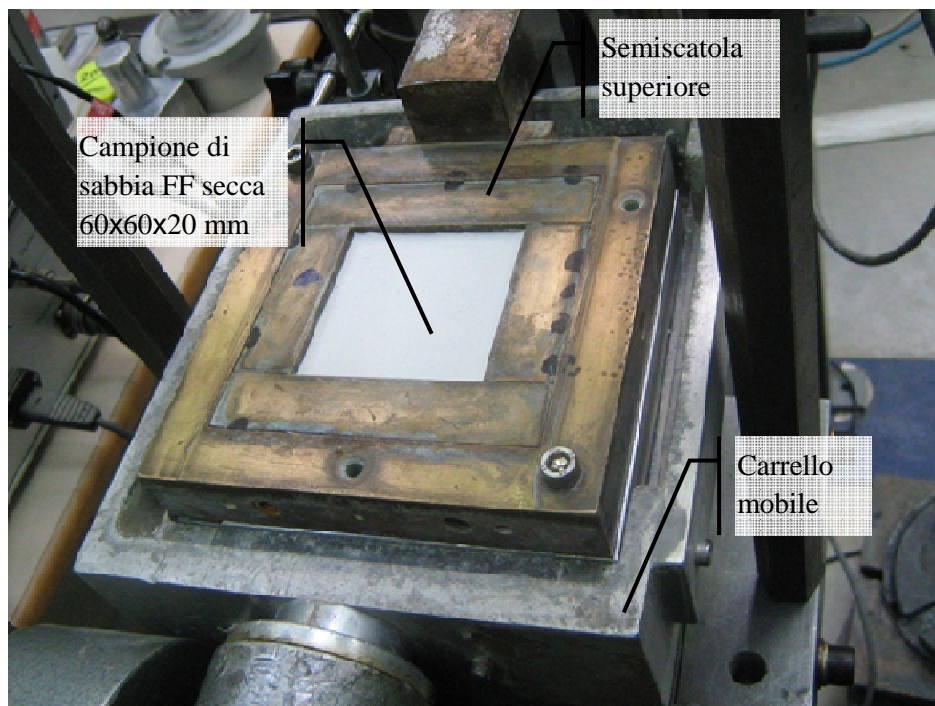


-Figura 3.3 – Apparecchiatura di taglio diretto a rigidità normale imposta.

Il dispositivo di prova è fissato ad un telaio rigido vincolato al terreno tramite perni ed è composto da 3 unità fondamentali:

- il *motore* che movimentata il carrello con una velocità costante mediante un sistema meccanico ad ingranaggi;
- il *carrello* a tenuta stagna che scorre, tramite cuscinetti a sfera atti a ridurre l'attrito, su una coppia di guide fissate al telaio di supporto; all'interno del carrello è alloggiata la scatola di taglio vera e propria contenente il campione ricostruito di sabbia FF;
- la *cella di carico orizzontale* che permette di misurare la forza di taglio che si genera sul piano imposto di scorrimento; essa è vincolata ad un sistema di contrasto collegato alla semiscatola superiore.

La scatola di taglio di Casagrande è composta da due semiscatole, una superiore fissa (Fig. 3.4) ed una inferiore mobile, sostituita nelle prove di interfaccia da una piastra metallica rigida di rugosità nota. Nella campagna di prove recentemente eseguita il campione ricostruito di sabbia FF ha forma parallelepipedica e dimensione costante di 60x60x20 mm, mentre le prove precedentemente eseguite, si riferiscono a campioni di dimensioni 100x100x12 mm, per quelle di interfaccia, e 100x100x20 mm, per quelle su sola sabbia secca.



*-Figura 3.4 – Scatola di taglio contenente il campione ricostruito di sabbia FF.*

La prova è condotta in due fasi: la prima di consolidazione e la seconda di taglio.

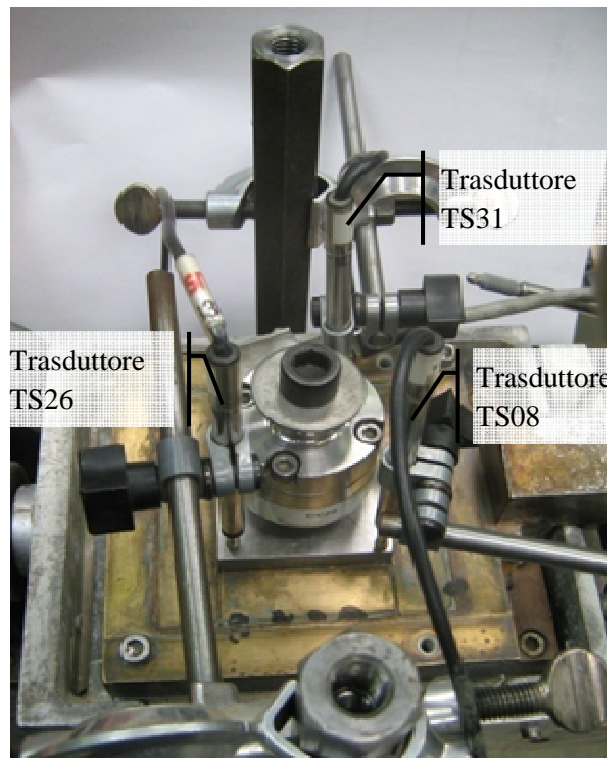
Durante la prima fase, un carico verticale  $N$  è applicato tramite un ripartitore rigido alla testa del provino ricostruito. L'entità della forza è misurata da una cella di carico, da 0.5 kN di fondo scala, vincolata inferiormente alla piastra ripartitrice e superiormente alla molla utilizzata per simulare la rigidità  $k$  prefissata. La forza è generata precaricando la molla la quale è vincolata ad una estremità ad un telaio rigido, che non permette spostamenti, mentre all'altra è appoggiata sulla cella di carico verticale solidale al ripartitore: in tale configurazione la molla fornisce una rigidità costante al provino.

Sono disposti 3 trasduttori di spostamento verticali (Fig. 3.5), posti in corrispondenza degli angoli del ripartitore, per permettere di descrivere il cinematismo della piastra di carico e stimare, di conseguenza, la variazione media dell'altezza del campione di sabbia secca FF.

Durante la prima fase sono misurati i cedimenti del campione di sabbia e il carico assiale applicato.

La fase di consolidazione si ritiene conclusa quando il provino non manifesta più cedimenti sotto il carico normale costante  $N$ .





*-Figura 3.5 – Particolare del posizionamento dei 3 trasduttori di spostamento verticali.*

Nella seconda fase il motore passo a passo fa scorrere la parte inferiore della scatola di taglio, applicando una velocità costante di 0.31 mm/min. La velocità di scorrimento imposta, particolarmente rapida, non ha influenza sui risultati ottenuti in quanto la prova è eseguita su materiale granulare secco, come documentato in Ferrero [1996].

La forza tagliente  $T$  è misurata da una cella di carico orizzontale da 1 kN di fondo scala alloggiata all'interno di un sistema di contrasto solidale alla semiscatola superiore. Lo scorrimento del carrello è registrato da un trasduttore di spostamento orizzontale. La fase di taglio si ritiene conclusa quando è raggiunto uno scorrimento  $w$  pari almeno al 10% del lato del campione (almeno 6 mm).

Tutte le misure sono acquisite automaticamente da un elaboratore di calcolo che ha permesso di monitorare i dati in tempo reale fornendo una prima indicazione della qualità delle prove eseguite.

Le prove DS-CNS sono svolte a diversi valori di rigidità normale  $k$  imposta: oltre a  $k=0$  kPa/mm, rappresentante la situazione limite di



carico normale costante, sono applicati  $k=100$  kPa/mm, utilizzando una molla meccanica, e  $k=1000$  kPa/mm, impiegandone una idraulica.

La rigidezza  $k^*$  di una molla meccanica è costante in quanto funzione del modulo di Young del materiale che la costituisce e del suo numero di spire. Per simulare  $k=100$  kPa/mm è impiegata una molla di acciaio (Fig. 3.6), la cui rigidezza  $k^*$  è verificata attraverso una serie di cicli di carico e scarico, eseguiti utilizzando una pressa:

$$k^*=F/u \quad [FL^{-1}] \quad (3.2)$$

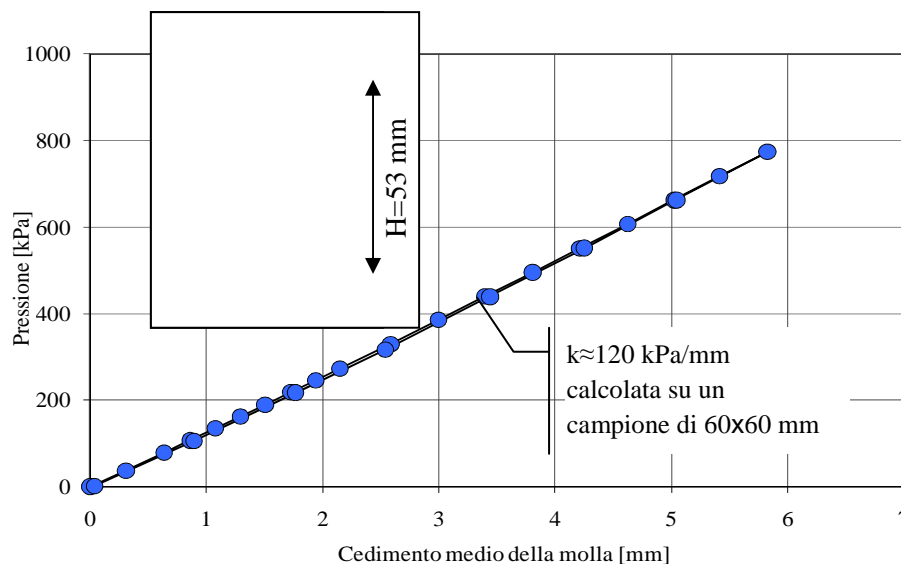
La rigidezza  $k$  di prova è poi determinata calcolando:

$$k=(F/A_c)/u \quad [FL^{-2}L^{-1}] \quad (3.3)$$

Con:

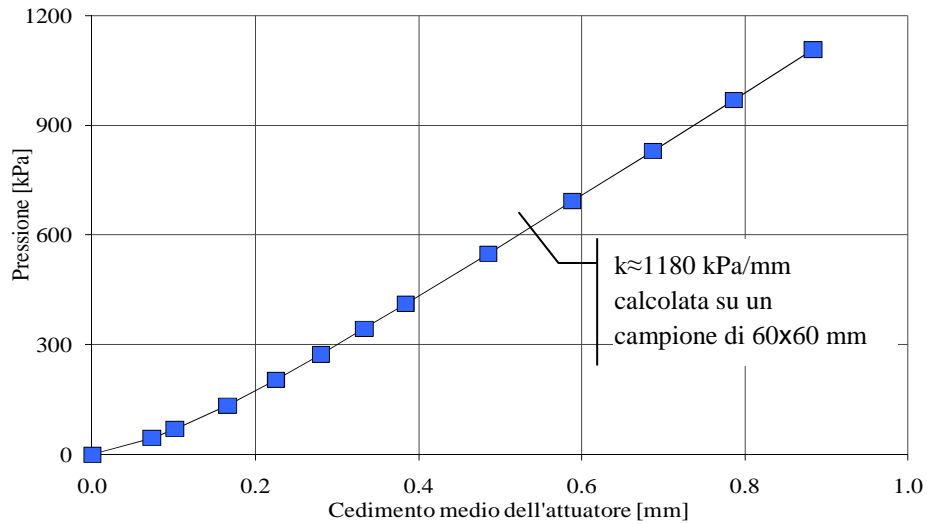
$A_c$ = area del provino 60x60 mm

Un ciclo della taratura effettuata è mostrato in Figura 3.6 riferito alla determinazione di  $k$  della molla meccanica.

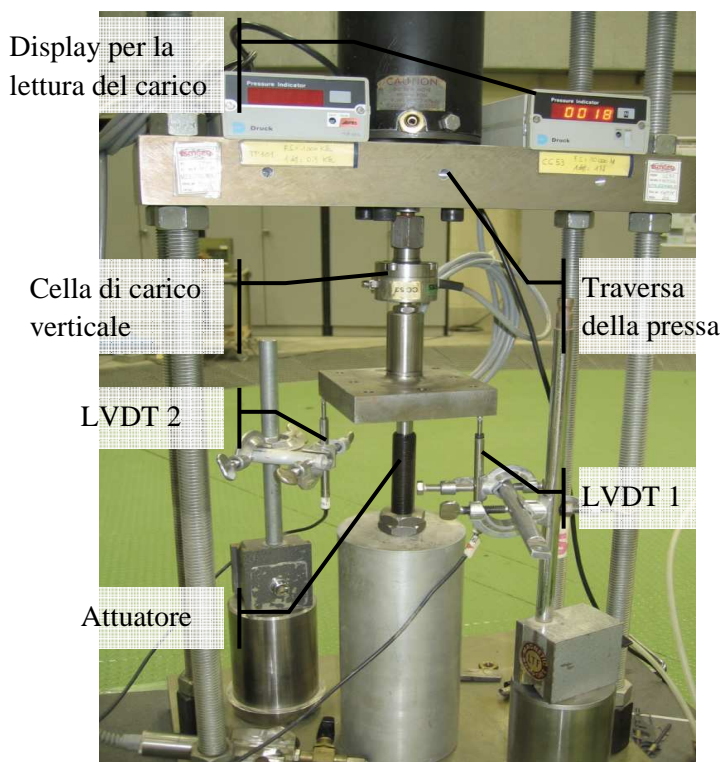


-Figura 3.6 – Ciclo di taratura e dettagli geometrici della molla con rigidezza nominale  $k=100$  kPa/mm.

Per applicare una rigidezza  $k=1000$  kPa/mm, si è adottato un pistone idraulico ad olio. La procedura di taratura, di cui un ciclo di carico è mostrato in Figura 3.7a, è stata uguale a quella sperimentata per la molla meccanica. In Figura 3.7b è mostrata una fotografia del pistone in fase di taratura.



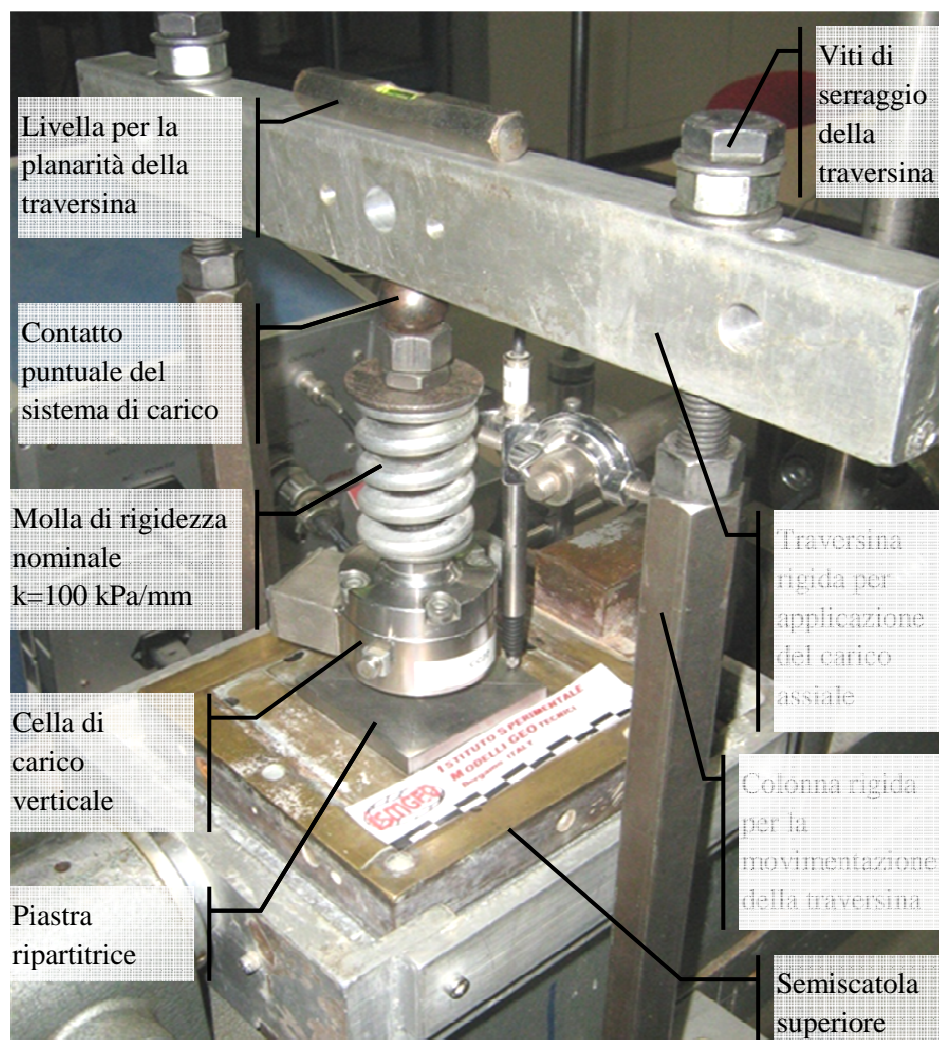
-Figura 3.7a – Ciclo di taratura dell'attuatore con rigidità nominale  $k=1000$  kPa/mm.



-Figura 3.7b – Taratura dell'attuatore con rigidità nominale  $k=1000$  kPa/mm.

L'elemento molla è alloggiato tra la cella di carico verticale e la traversina di applicazione del carico stesso, come mostrato in Figura 3.8.

Durante la fase di consolidazione la traversina segue i cedimenti del provino per garantire un carico costante, successivamente, durante lo scorrimento, la traversina è bloccata nella posizione di fine consolidazione e la molla si deforma solo in funzione delle variazioni di altezza del campione di sabbia, restituendo conseguentemente una pressione normale al provino variabile secondo la relazione (3.3). Il collegamento tra la molla e la traversina rigida è realizzato tramite una biglia per garantire l'assialità del carico verticale (Fig. 3.8).

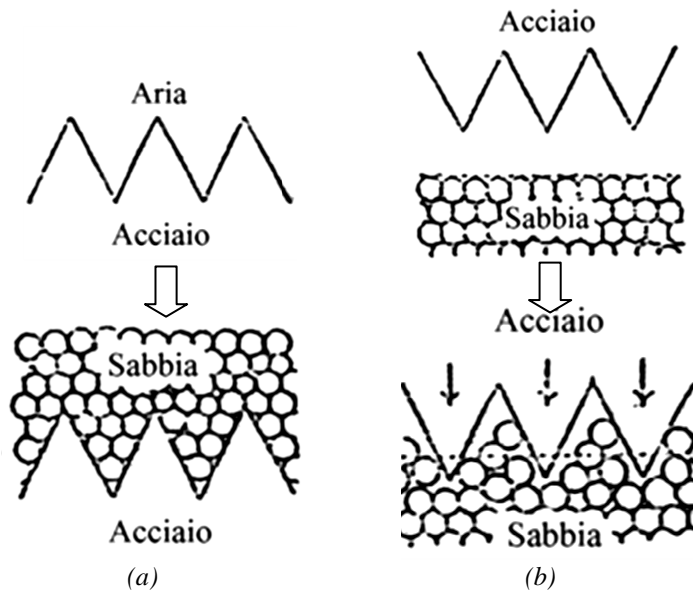


*-Figura 3.8 – Particolare dell'alloggiamento della molla e dell'intelaiatura rigida utilizzata per l'applicazione del carico assiale N.*

### 3.2.2 PREPARAZIONE DEL CAMPIONE

La ricostruzione del campione di sabbia secca FF è eseguita direttamente all'interno della scatola di taglio, già posizionata nel carrello mobile.

Per le prove di interfaccia la piastra metallica rigida di rugosità predefinita è alloggiata preventivamente all'interno della semiscatola inferiore, mentre la sabbia è deposta nella semiscatola superiore. La scelta di questa sequenza depositiva garantisce un incastro ottimale tra i grani di sabbia e le asperità della piastra (Fig. 3.9a) [Uesugi e Kishida 1986a], diversamente dalla sequenza opposta (Fig. 3.9b), per la quale si è osservato che la sabbia non penetra nelle asperità dell'interfaccia rendendo l'attrito mobilitato inferiore rispetto al valore reale.



-Figura 3.9 –Schemi di deposizione: (a) Yoshimi e Kishida [1981]; (b) Uesugi e Kishida [1986a] (da [Uesugi e Kishida 1986a]).

Durante la deposizione le due semiscatole sono mantenute in asse da viti di serraggio, successivamente rimosse per permettere la fase di taglio.

La ricostruzione del campione di sabbia secca FF è eseguita con la tecnica denominata *sottocompattazione*: il metodo prevede di deporre il materiale in strati compattati singolarmente fino al raggiungimento del grado di addensamento desiderato, che corrisponde ad un certo spessore del provino. I provini analizzati hanno altezze di 20 mm, per le prove su sola sabbia mentre, per le prove di interfaccia, l'altezza è di 12 mm, per

quelle della banca dati, e di 20 mm, per le più recenti: la differenza sembra non comportare significativi effetti sui valori tensionali ottenuti [Garnier 2002].

In entrambe le campagne sperimentali, i campioni sono ricostruiti a due gradi di addensamento: una media densità (MD) prossima a 45% e una alta (HD) pari a circa 85%.

### 3.3 CAMPAGNA SPERIMENTALE

Le variabili indagate nella sperimentazione DS-CNS sono state:

- densità relativa (MD≈45% e HD≈85%);
- stato tensionale iniziale ( $\sigma'_{n0} = 25 - 75 - 100 - 150 - 300$  kPa), con particolare interesse al campo di sollecitazioni ricreato anche nelle prove in centrifuga sui pali modello ( $\sigma'_{n0} \leq 150$  kPa);
- rigidezza  $k$  imposta ( $k = 0 - 100 - 1000$  kPa/mm);
- rugosità della piastra che simula il fusto del palo trivellato gettato in opera ( $R_n = 0.03 - 0.14 - 0.31 - 0.43 - 0.6 - 0.8$ ).

In Tabella 3.1 sono riassunti i dati delle prove DS-CNS condotte su campioni di sola sabbia, mentre in Tabella 3.2 sono raccolti quelli relativi alle prove di interfaccia. Le Tabelle 3.1 e 3.2 mostrano, oltre alle caratteristiche identificative di ciascuna prova, i risultati significativi in termini di tensioni e scorrimenti ottenuti al raggiungimento della condizione di picco e di volume costante.

Rispetto alla totalità dei dati disponibili (circa 150 prove DS-CNS), alcune prove sono state scartate in quanto i risultati finali sono apparsi condizionati da problematiche sperimentali.

Nel seguito, facendo riferimento alle informazioni contenute nelle Tabelle 3.1 e 3.2, le prove DS-CNS saranno indicate con una sigla composta in successione dai seguenti dati:

- densità relativa: -MD- e -HD-
- tipologia di prova: prova su sola sabbia indicata come -FF-, prova con interfaccia indicata con il -valore- di  $R_n$  corrispondente
- rigidezza normale imposta: -100- per  $k=100$  kPa/mm e -1000- per  $k=1000$  kPa/mm
- tensione normale iniziale: -25- per  $\sigma'_{n0}=25$  kPa, -75- per  $\sigma'_{n0}=75$  kPa, -100- per  $\sigma'_{n0}=100$  kPa, -150- per  $\sigma'_{n0}=150$  kPa, -300- per  $\sigma'_{n0}=300$  kPa.

I grafici in termini di tensioni e spostamenti delle prove DS-CNS relative ai campioni di sola sabbia e a quelli con  $R_n=0.6$  e  $R_n=0.8$ ,

elencate in Tabella 3.1 e 3.2, sono riportati nell'Allegato A. Per le restanti prove, appartenenti alla campagna sperimentale precedente, si rimanda a Troni [1997] e Mortara [2001].

| Prove DS-CNS – SABBIA FF- SABBIA FF |          |                |             |          |                  |              |                  |
|-------------------------------------|----------|----------------|-------------|----------|------------------|--------------|------------------|
|                                     |          |                | PICCO       |          |                  | VOLUME COST. |                  |
| $D_R$                               | k        | $\sigma'_{n0}$ | $\tau_{su}$ | $w_{su}$ | $\sigma'_{n su}$ | $\tau_{cv}$  | $\sigma'_{n cv}$ |
|                                     | [kPa/mm] | [kPa]          | [kPa]       | [mm]     | [kPa]            | [kPa]        | [kPa]            |
| MD<br>14 prove                      | 0        | 100            | 76          | 6.80     | 100              | 76           | 100              |
|                                     |          | 150            | 104         | 8.33     | 150              | 103          | 148              |
|                                     |          | 300            | 209         | 7.01     | 300              | 209          | 300              |
|                                     | 100      | 100            | 87          | 7.29     | 103              | 84           | 103              |
|                                     |          | 150            | 113         | 6.50     | 143              | 113          | 143              |
|                                     |          | 300            | 220         | 9.11     | 285              | 220          | 285              |
|                                     |          | 25             | 30          | 5.98     | 31               | 30           | 31               |
|                                     |          | 75             | 60          | 6.50     | 68               | 60           | 68               |
|                                     |          | 150            | 119         | 6.80     | 142              | 119          | 142              |
|                                     |          | 100            | 92          | 8.36     | 118              | 92           | 118              |
|                                     | 1000     | 150            | 133         | 7.75     | 156              | 129          | 157              |
|                                     |          | 300            | 167         | 7.73     | 223              | 166          | 217              |
|                                     |          | 75             | 48          | 4.64     | 62               | 48           | 62               |
|                                     |          | 150            | 125         | 5.15     | 147              | 125          | 149              |
| HD<br>14 prove                      | 0        | 100            | 103         | 3.00     | 100              | 94           | 99               |
|                                     |          | 150            | 132         | 3.83     | 150              | 130          | 149              |
|                                     |          | 300            | 271         | 5.66     | 300              | 258          | 299              |
|                                     | 100      | 100            | 146         | 7.30     | 138              | 139          | 144              |
|                                     |          | 150            | 169         | 6.03     | 172              | 163          | 179              |
|                                     |          | 300            | 318         | 6.95     | 331              | 285          | 334              |
|                                     |          | 25             | 38          | 2.11     | 38               | 38           | 38               |
|                                     |          | 75             | 86          | 4.27     | 97               | 86           | 97               |
|                                     |          | 150            | 161         | 3.45     | 176              | 146          | 180              |
|                                     |          | 100            | 279         | 8.78     | 312              | 267          | 292              |
|                                     | 1000     | 150            | 309         | 8.26     | 354              | 307          | 352              |
|                                     |          | 300            | 412         | 6.99     | 470              | 402          | 459              |
|                                     |          | 75             | 155         | 4.64     | 168              | 155          | 171              |
|                                     |          | 150            | 210         | 3.84     | 258              | 205          | 259              |

-Tabella 3.1 –Dati e risultati di prove DS – CNS su sola sabbia FF secca.

| Prove DS-CNS – INTERFACCIA con $0.03 \leq R_n \leq 0.8$ |                |          |                  |                 |                 |                    |                 |                    |
|---|----------------|----------|------------------|-----------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
|   |                |          |                  | PICCO           |                 |                    | VOL. COST       |                    |
| D <sub>R</sub>  | R <sub>n</sub> | k        | σ' <sub>n0</sub> | τ <sub>su</sub> | w <sub>su</sub> | σ' <sub>n/su</sub> | τ <sub>cv</sub> | σ' <sub>n/cv</sub> |
|   | [-]            | [kPa/mm] | [kPa]            | [kPa]           | [mm]            | [kPa]              | [kPa]           | [kPa]              |
| MD<br>44 prove  | 0.03           | 0        | 100              | 53              | 1.37            | 100                | 53              | 100                |
|   |                |          | 150              | 79              | 1.33            | 150                | 77              | 150                |
|   |                |          | 300              | 157             | 2.07            | 300                | 157             | 300                |
|   |                | 100      | 100              | 51              | 1.34            | 95                 | 49              | 95                 |
|   |                |          | 150              | 76              | 1.12            | 142                | 73              | 142                |
|   |                |          | 300              | 148             | 1.31            | 288                | 139             | 288                |
|   |                | 1000     | 100              | 38              | 0.99            | 73                 | 33              | 70                 |
|   |                |          | 150              | 68              | 0.88            | 126                | 63              | 125                |
|   |                |          | 300              | 136             | 1.27            | 261                | 133             | 262                |
|   | 0.14           | 0        | 100              | 69              | 2.09            | 100                | 61              | 99                 |
|   |                |          | 150              | 99              | 2.86            | 149                | 87              | 149                |
|   |                |          | 300              | 199             | 2.90            | 300                | 178             | 296                |
|   |                | 100      | 100              | 70              | 2.78            | 102                | 61              | 101                |
|   |                |          | 150              | 97              | 2.66            | 150                | 87              | 147                |
|   |                |          | 300              | 186             | 3.08            | 297                | 168             | 294                |
|   |                | 1000     | 100              | 65              | 2.46            | 101                | 54              | 90                 |
|   |                |          | 150              | 101             | 2.84            | 153                | 82              | 138                |
|   |                |          | 300              | 184             | 2.85            | 294                | 160             | 280                |
|   | 0.31           | 0        | 100              | 73              | 3.80            | 100                | 71              | 99                 |
|   |                |          | 150              | 101             | 3.78            | 150                | 98              | 147                |
|   |                |          | 300              | 202             | 3.50            | 300                | 195             | 296                |
|   |                | 100      | 100              | 77              | 4.13            | 103                | 76              | 101                |
|   |                |          | 150              | 115             | 3.19            | 152                | 111             | 150                |
|   |                |          | 100              | 82              | 4.08            | 117                | 74              | 99                 |
|   |                | 1000     | 150              | 121             | 4.15            | 173                | 107             | 143                |
|   |                |          | 300              | 200             | 4.39            | 292                | 181             | 258                |
|   | 0.43           | 0        | 100              | 72              | 2.73            | 100                | 70              | 99                 |
|   |                |          | 150              | 114             | 2.77            | 150                | 103             | 150                |
|   |                |          | 300              | 205             | 3.37            | 300                | 196             | 300                |
|   |                | 100      | 100              | 76              | 4.04            | 104                | 71              | 99                 |
|   |                |          | 150              | 105             | 3.13            | 151                | 101             | 147                |
|   |                |          | 300              | 188             | 4.02            | 294                | 182             | 289                |
|   |                | 1000     | 100              | 70              | 4.74            | 100                | 56              | 82                 |
|   |                |          | 150              | 121             | 4.00            | 187                | 99              | 146                |
|   |                |          | 300              | 186             | 3.88            | 283                | 168             | 255                |
|   | 0.60           | 100      | 25               | 19              | 1.54            | 22                 | 19              | 22                 |
|   |                |          | 75               | 45              | 1.75            | 61                 | 45              | 61                 |
|   |                |          | 150              | 95              | 2.17            | 135                | 94              | 135                |
|   |                | 1000     | 75               | 42              | 2.10            | 50                 | 42              | 51                 |

| Prove DS-CNS – INTERFACCIA con $0.03 \leq R_n \leq 0.8$ |                |          |                  |                 |                 |                    |                 |                    |
|---|----------------|----------|------------------|-----------------|-----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
|   |                |          | PICCO            |                 |                 |                    | VOL. COST       |                    |
| D <sub>R</sub>  | R <sub>n</sub> | k        | σ' <sub>n0</sub> | τ <sub>su</sub> | w <sub>su</sub> | σ' <sub>n/su</sub> | τ <sub>cv</sub> | σ' <sub>n/cv</sub> |
|   | [-]            | [kPa/mm] | [kPa]            | [kPa]           | [mm]            | [kPa]              | [kPa]           | [kPa]              |
| MD<br>44 prove  | 0.60           | 1000     | 150              | 70              | 1.76            | 97                 | 70              | 97                 |
|   | 0.80           | 100      | 25               | 24              | 5.58            | 20                 | 24              | 21                 |
|   |                |          | 75               | 52              | 1.88            | 65                 | 52              | 66                 |
|   |                |          | 150              | 104             | 2.06            | 141                | 104             | 142                |
|   |                | 1000     | 75               | 54              | 3.92            | 63                 | 54              | 63                 |
|   |                |          | 150              | 75              | 2.47            | 94                 | 75              | 94                 |
| HD<br>46 prove  | 0.03           | 0        | 100              | 54              | 1.05            | 100                | 54              | 100                |
|   |                |          | 150              | 82              | 1.42            | 150                | 81              | 150                |
|   |                |          | 300              | 149             | 1.32            | 300                | 144             | 300                |
|   |                | 100      | 100              | 54              | 1.34            | 99                 | 53              | 100                |
|   |                |          | 150              | 75              | 1.27            | 146                | 74              | 146                |
|   |                |          | 300              | 152             | 0.97            | 294                | 149             | 294                |
|   |                | 1000     | 100              | 46              | 0.85            | 88                 | 44              | 89                 |
|   |                |          | 150              | 67              | 1.22            | 132                | 67              | 134                |
|   |                |          | 300              | 154             | 1.03            | 285                | 151             | 287                |
|   | 0.14           | 0        | 100              | 71              | 1.45            | 100                | 64              | 100                |
|   |                |          | 150              | 96              | 1.23            | 150                | 88              | 149                |
|   |                |          | 300              | 183             | 1.35            | 300                | 170             | 300                |
|   |                | 100      | 100              | 66              | 1.47            | 99                 | 60              | 103                |
|   |                |          | 150              | 97              | 1.34            | 152                | 86              | 151                |
|   |                |          | 300              | 186             | 1.46            | 302                | 168             | 303                |
|   |                | 1000     | 100              | 73              | 1.49            | 120                | 69              | 124                |
|   |                |          | 150              | 112             | 1.33            | 176                | 105             | 183                |
|   |                |          | 300              | 191             | 1.41            | 307                | 176             | 316                |
|   | 0.31           | 0        | 100              | 78              | 1.73            | 100                | 70              | 100                |
|   |                |          | 150              | 112             | 1.77            | 150                | 97              | 147                |
|   |                |          | 300              | 211             | 2.56            | 300                | 189             | 296                |
|   |                | 100      | 100              | 82              | 1.98            | 107                | 77              | 111                |
|   |                |          | 150              | 123             | 2.23            | 156                | 112             | 159                |
|   |                |          | 300              | 209             | 2.25            | 302                | 198             | 303                |
|   |                | 1000     | 100              | 101             | 2.87            | 145                | 94              | 141                |
|   |                |          | 150              | 132             | 2.34            | 197                | 128             | 200                |
|   |                |          | 300              | 224             | 2.79            | 330                | 211             | 328                |
|   | 0.43           | 0        | 100              | 74              | 1.82            | 100                | 66              | 100                |
|   |                |          | 150              | 114             | 2.44            | 150                | 99              | 151                |
|   |                |          | 300              | 205             | 2.44            | 300                | 188             | 300                |
|   |                | 100      | 100              | 80              | 2.12            | 105                | 74              | 108                |
|   |                |          | 150              | 110             | 1.81            | 157                | 102             | 160                |
|   |                |          | 300              | 200             | 1.86            | 304                | 191             | 306                |



| Prove DS-CNS – INTERFACCIA con $0.03 \leq R_n \leq 0.8$ |       |          |                |             |          |                  |             |                  |
|---|-------|----------|----------------|-------------|----------|------------------|-------------|------------------|
|   |       |          |                | PICCO       |          |                  | VOL. COST   |                  |
| $D_R$   | $R_n$ | $k$      | $\sigma'_{n0}$ | $\tau_{su}$ | $w_{su}$ | $\sigma'_{n su}$ | $\tau_{cv}$ | $\sigma'_{n cv}$ |
|   | [-]   | [kPa/mm] | [kPa]          | [kPa]       | [mm]     | [kPa]            | [kPa]       | [kPa]            |
| HD<br>46 prove  | 0.43  | 1000     | 100            | 107         | 2.56     | 162              | 98          | 153              |
|   |       |          | 150            | 134         | 2.42     | 197              | 129         | 203              |
|   |       |          | 300            | 248         | 2.48     | 364              | 224         | 355              |
|   | 0.60  | 100      | 25             | 24          | 1.17     | 24               | 22          | 26               |
|   |       |          | 75             | 65          | 0.83     | 78               | 58          | 84               |
|   |       |          | 150            | 113         | 0.95     | 150              | 105         | 152              |
|   |       | 1000     | 75             | 67          | 0.80     | 81               | 65          | 94               |
|   |       |          | 150            | 124         | 1.00     | 162              | 116         | 166              |
|   |       | 0.80     | 25             | 33          | 1.01     | 32               | 31          | 35               |
|   |       |          | 75             | 66          | 0.88     | 78               | 60          | 81               |
|   |       |          | 150            | 137         | 0.99     | 164              | 119         | 172              |
|   |       | 1000     | 75             | 88          | 0.92     | 108              | 83          | 118              |
|   |       |          | 150            | 185         | 1.70     | 239              | 175         | 251              |

-Tabella 3.2 –Dati e risultati di prove DS – CNS con piastra di interfaccia di  $0.03 \leq R_n \leq 0.80$ .

### 3.3.1 CENNI SU ALCUNE PROBLEMATICHE SPERIMENTALI

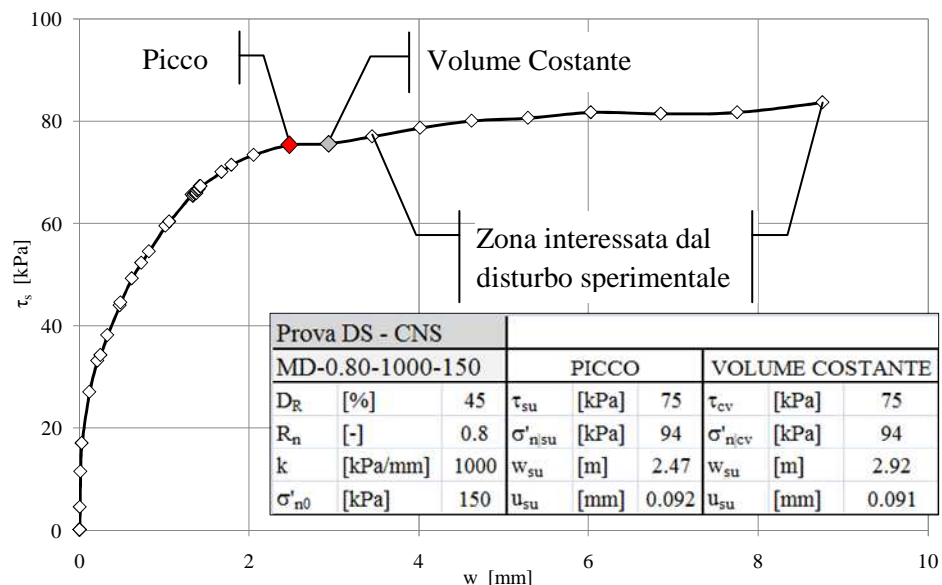
In alcune prove DS-CNS non è raggiunta la condizione di stato critico a causa di problemi sperimentali di seguito descritti. Per tali prove il valore di resistenza a volume costante è assunto pari a quello di picco, ipotizzando un comportamento incrudente della sabbia.

In Figura 3.10 si riporta una curva  $\tau_s - w$  di una prova di interfaccia a MD che ha manifestato un continuo incremento delle  $\tau_s$  probabilmente dovuto all'attrito generato da alcuni granelli di sabbia interposti tra le due superfici metalliche della scatola di taglio.

Il disturbo riscontrato è frequentemente documentato in letteratura: a causa delle disuniformità della distribuzione delle forze durante la fase di taglio, si genera una coppia che provoca una rotazione, e di conseguenza un innalzamento, della semiscatola superiore con una conseguente opposta rotazione della piastra di ripartizione del carico [Ingold 1982; Jewell e Wroth 1987; Ooi e Carter 1987; Jewell 1989; Hoteit 1990; Al-Douri e Poulos 1991; Ferrero 1996; Mortara 2001]. Il movimento della semiscatola superiore è responsabile della fuoriuscita di alcuni granelli di sabbia sul perimetro dell'alloggiamento del provino: il fenomeno è

progressivo ma, nelle prove studiate, diventa maggiormente evidente per spostamenti orizzontali di circa 2.5-3 mm.

Al termine di una prova DS-CNS sono state fotografate le due semiscatole, mostrate in Figura 3.11: è evidente la presenza della sabbia FF sul perimetro dell'alloggiamento del provino, con un quantitativo di materiale maggiore sui lati ortogonali al moto.



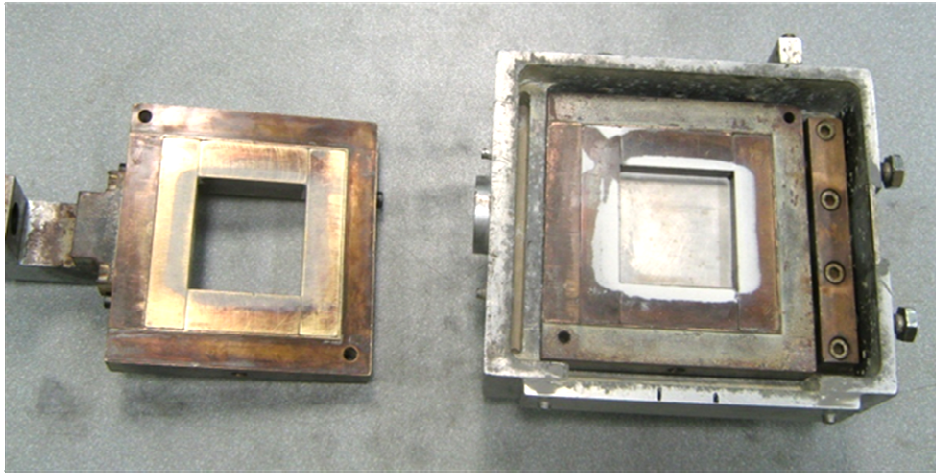
-Figura 3.10–Curva  $\tau_s - w$  della prove DS-CNS di interfaccia MD-0.80-1000-150.

Al fine di ridurre il fenomeno vari accorgimenti sono stati adottati.

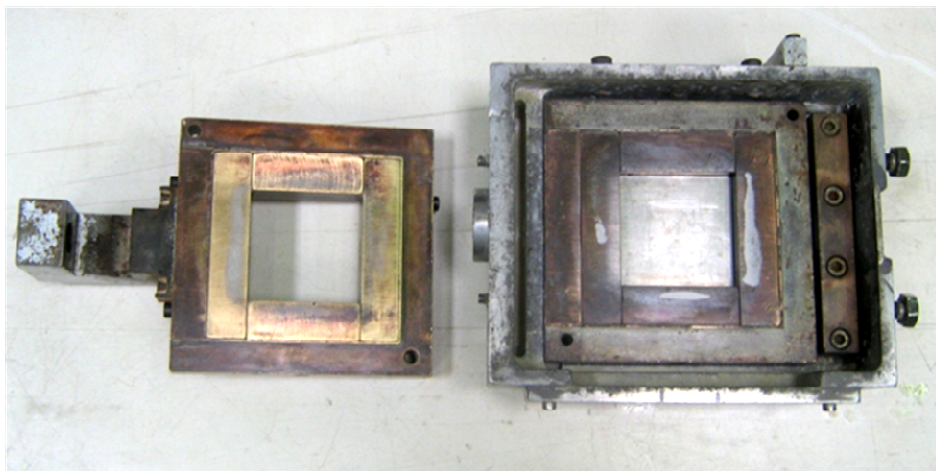
Innanzitutto si è verificata la perfetta complanarità delle due semiscatole alla fine del montaggio.

Inoltre si è applicato un sottile film di grasso al silicone sul perimetro di contatto delle due semiscatole allo scopo di creare un “ostacolo” al passaggio delle particelle di sabbia FF: la fuoriuscita del materiale si è ridotta come è osservabile dal confronto tra le Figure 3.11 e 3.12.

Gli accorgimenti messi in atto hanno permesso di limitare l’entità del disturbo generato dalla migrazione della sabbia durante lo scorrimento senza tuttavia eliminare completamente il fenomeno che ha continuato a presentarsi per spostamenti  $w > 3$  mm, in genere successivi al raggiungimento del picco tensoriale.



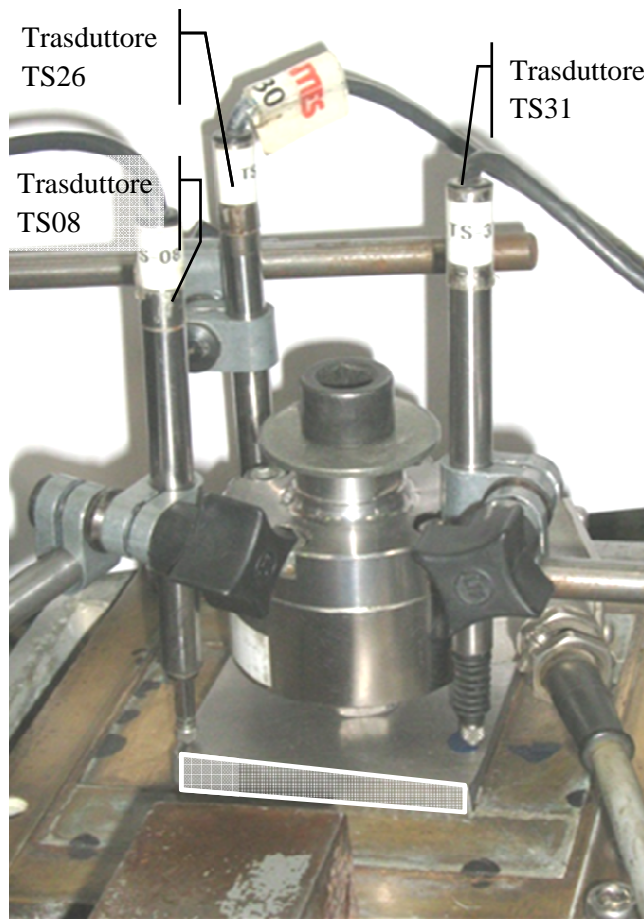
*-Figura 3.11 –Fuoriuscita di sabbia FF sul perimetro dell'alloggiamento del provino: immagine a fine prova.*



*-Figura 3.12 –Fuoriuscita di sabbia FF sul perimetro dell'alloggiamento del provino dopo l'applicazione di un film di grasso al silicone: immagine a fine prova.*

La fuoriuscita di grani di sabbia provoca una rotazione della piastra di carico rispetto all'asse di moto, come mostrato in Figura 3.13. Per ridurre questo effetto si è agito limitando il gioco presente tra il ripartitore e il suo alloggiamento applicando del nastro isolante attorno alla testa di carico.

Anche in questo caso, la soluzione adottata ha portato ad un miglioramento della risposta in fase di taglio senza però eliminare completamente il disturbo.



*-Figura 3.13 –Rotazione della testa di carico indotta dalla fuoriuscita della sabbia.*

A causa della rotazione della piastra di carico, lo spostamento verticale usato nell'interpretazione delle prove è stato calcolato mediando le letture dei tre trasduttori verticali, TS08, TS26 e TS31, come segue:

$$u_1 = \frac{u_{TS\ 26} + u_{TS\ 31}}{2} \quad [L] \quad (3.4)$$

$$u_{medio} = \frac{u_1 + u_{TS\ 08}}{2} \quad [L] \quad (3.5)$$

### 3.4 RISULTATI SPERIMENTALI

I risultati di alcune prove DS-CNS sono selezionati e messi a confronto allo scopo di illustrare l'indagine svolta, riguardante l'effetto che una variazione di rigidità normale imposta e di tensione normale iniziale producono sulla mobilitazione dell'attrito.

Risultati di prove DS-CNS su provini di sola sabbia sono comparati con altri ottenuti in presenza di una piastra rugosa, a parità di condizioni al contorno ( $D_R$ ,  $k$ ,  $\sigma'_{n0}$ ), per analizzare come la presenza di una superficie rigida, in corrispondenza del piano di scorrimento, condizioni lo sviluppo delle tensioni tangenziali. A titolo di esempio, si sono scelte le prove eseguite con piastra di  $R_n=0.6$ .

#### 3.4.1 EFFETTO DELLA RIGIDEZZA $k$

I risultati di 4 prove DS-CNS eseguite su provini di sola sabbia FF, ricostruiti a MD e HD, sono confrontati tra loro e, successivamente, con altrettante prove di interfaccia, condotte alle medesime condizioni al contorno ( $D_R$ ,  $k$ ,  $\sigma'_{n0}$ ), per analizzare gli effetti che la variazione della rigidità normale imposta produce sulla mobilitazione dell'attrito del materiale granulare.

Le caratteristiche delle prove selezionate sono riassunte in Tabella 3.3: esse differiscono per grado di addensamento e per rigidità  $k$  mentre sperimentano la stessa tensione normale iniziale  $\sigma'_{n0}=150$  kPa.

| Prove DS-CNS             |                   | $\sigma'_{n0}=150$ kPa |                 |
|--------------------------|-------------------|------------------------|-----------------|
|                          |                   | $k=100$ kPa/mm         | $k=1000$ kPa/mm |
| Sabbia FF -<br>Sabbia FF | MD $\approx 45\%$ | MD-FF-100-150          | MD-FF-1000-150  |
|                          | HD $\approx 85\%$ | HD-FF-100-150          | HD-FF-1000-150  |
| Sabbia FF -<br>$R_n=0.6$ | MD $\approx 45\%$ | MD-0.6-100-150         | MD-0.6-1000-150 |
|                          | HD $\approx 85\%$ | HD-0.6-100-150         | HD-0.6-1000-150 |

-Tabella 3.3 - Prove DS-CNS sabbia su sabbia e con interfaccia  $R_n=0.6$ , aventi  $\sigma'_{n0}=150$  kPa.

In Figura 3.14 sono riportati alcuni risultati delle 4 prove eseguite su sola sabbia (Tab. 3.3), mentre in Figura 3.15 sono rappresentati quelli delle prove di interfaccia tra sabbia secca FF e la piastra avente  $R_n=0.6$  (Tab. 3.3).

Le curve di mobilitazione delle tensioni tangenziali (Figg. 3.14a e 3.15a) mostrano andamenti incrudenti per le prove a MD, con aumento

progressivo delle  $\tau_s$  fino ad un valore massimo, che poi si mantiene costante, mentre quelle a HD manifestano un andamento rammollente, caratterizzato dal raggiungimento di un picco con una successiva riduzione tensionale fino al valore di stato critico. A parità di densità relativa l'attrito appare indipendente dalla rigidità imposta per i campioni ricostruiti a MD, mentre risulta influenzato da  $k$  per quelli a HD, per i quali  $\tau_s$  aumenta al crescere di  $k$ .

Confrontando le Figure 3.14a e 3.15a è possibile osservare che lo sviluppo dell'attrito appare più lento e progressivo nelle prove su sola sabbia, mentre il raggiungimento della  $\tau_s$  massima,  $\tau_{su}$ , è più rapido per quelle eseguite in presenza di una piastra rugosa rigida.

Dal confronto (Figg. 3.14a e 3.15a) è inoltre possibile notare che le tensioni tangenziali mobilitate nelle prove su campioni di sola sabbia sono superiori rispetto a quelle ottenute con una piastra rugosa posta all'interfaccia. La riduzione della  $\tau_{su}$  che si produce inserendo un elemento rugoso rigido è indipendente dalla rigidità  $k$  imposta mentre è funzione della  $D_R$  del campione: a MD la  $\tau_{su}$  in Fig. 3.15a è circa 80% di  $\tau_{su}$  in Figura 3.14a, mentre a HD la differenza si riduce a circa il 65%.

La variazione della tensione tangenziale è prodotta da una parallela variazione della tensione  $\sigma'_n$ , normale al campione, funzione, attraverso la rigidità  $k$  della molla (eq.ne 3.3), dello spostamento verticale medio  $u$  del provino.

Confrontando le Figure 3.14b e 3.15b si può notare che tutti i percorsi tensionali sono caratterizzati da una prima fase in cui le  $\sigma'_n$  tendono a ridursi. Questa fase è accompagnata da una contrazione del provino (Figg. 3.14c e 3.15c) che si presenta a tutti i livelli di rigidità e di  $D_R$  imposti, seppure con entità variabili.

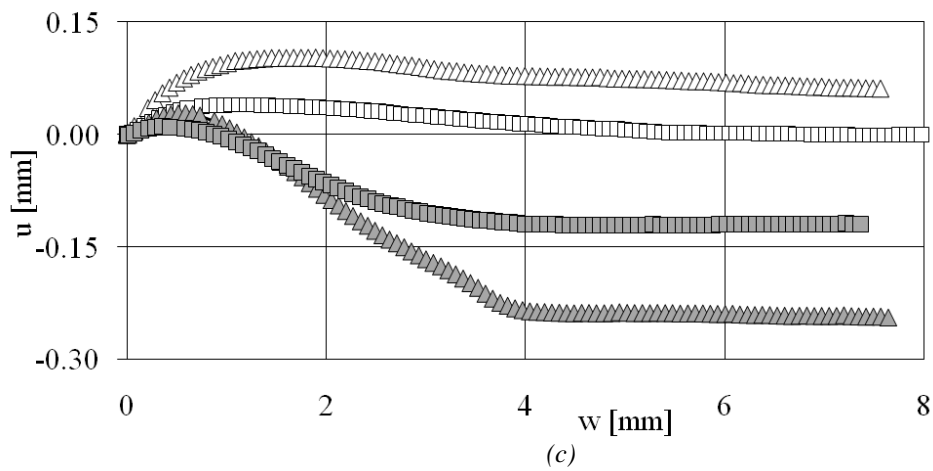
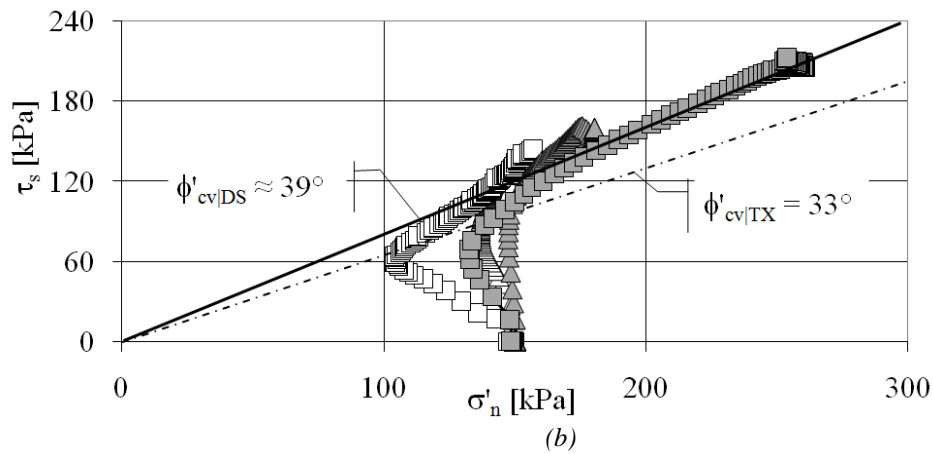
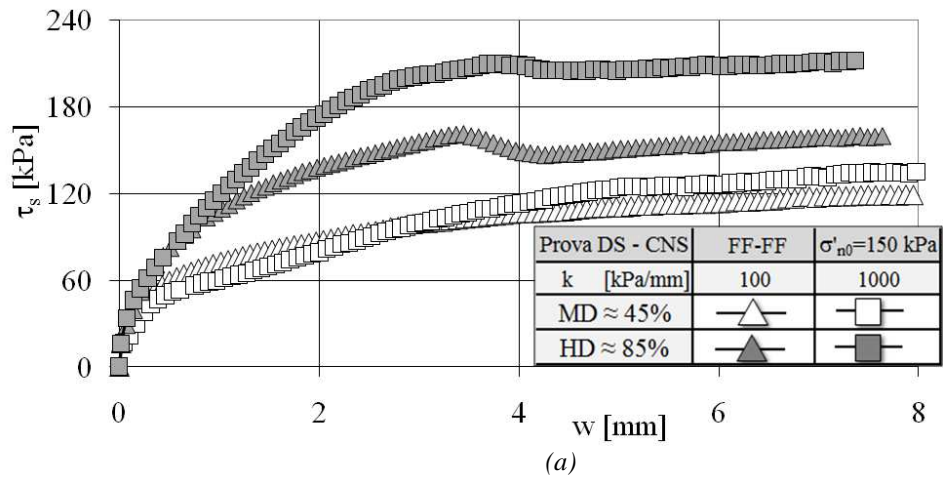
I campioni a MD manifestano una forte riduzione di volume, maggiore per le rigidità minori; superata la contrazione massima il provino tende a dilatare in misura maggiore nelle prove su sola sabbia. Questo comportamento differente in funzione della presenza di una piastra posta all'interfaccia, si rispecchia nelle curve  $\tau_s$ - $\sigma'_n$  dei provini a MD (Figg. 3.14b e 3.15b): nella fase iniziale di contrazione, la riduzione di  $\sigma'_n$  è analoga sia per le prove su sola sabbia che in quelle con interfaccia. Successivamente le prime sviluppano dei maggiori incrementi di  $\sigma'_n$  rispetto alle seconde, che al massimo raggiungono la  $\sigma'_{n0}$  iniziale.

I campioni a HD sono caratterizzati anch'essi da una fase iniziale di riduzione di volume (Figg. 3.14c e 3.15c) accompagnata da un parallelo calo di  $\sigma'_n$  rispetto al valore iniziale (Figg. 3.14b e 3.15b): l'entità della riduzione, in termini di variazione di altezza  $u$  del campione e di

decremento di  $\sigma'_n$  rispetto a  $\sigma'_{n0}$ , appare analoga indipendentemente dalla presenza di un'interfaccia rigida. Differente è invece il comportamento dilatante nei due casi. I campioni di sola sabbia si mostrano fortemente più dilatanti di quelli a contatto con la piastra di  $R_n=0.6$  (Figg. 3.14c e 3.15c); a questo aumento di volume corrisponde un incremento della tensione normale  $\sigma'_n$  maggiore per i provini di sola sabbia (Figg. 3.14b e 3.15b). In particolare per  $k=100$  kPa/mm la  $\sigma'_n$  raggiunta in condizioni di volume costante per la prova di interfaccia è circa 88% di quella mobilitata dal campione di sabbia, mentre a  $k=1000$  kPa/mm lo scarto si riduce a circa il 75%.

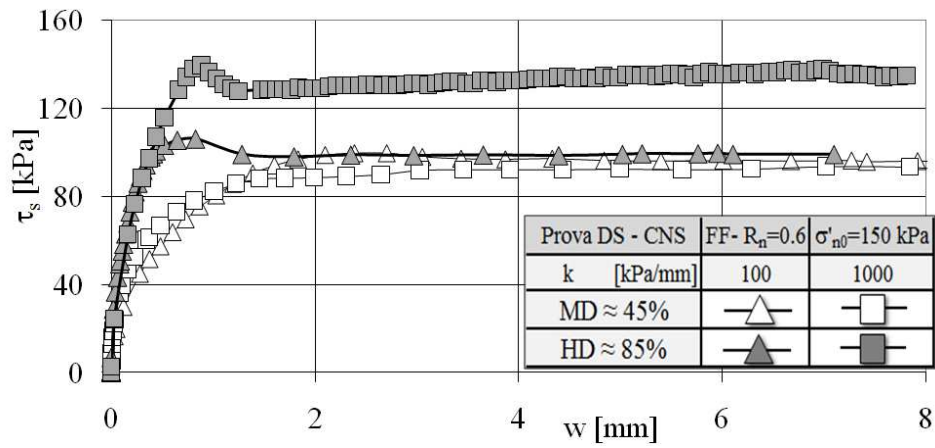
Interpolando i valori delle tensioni tangenziali minime, ritenuti indicativi del raggiungimento dello stato critico, è tracciata una linea di rottura avente intercetta nulla (Figg. 3.14b e 3.15b) e pendenza pari a  $\phi'_{cv|DS} \approx 39^\circ$ . Tale valore, superiore rispetto a quello ottenuto dalle prove triassiali  $\phi'_{cv|TX} \approx 33^\circ$ , è giustificato da ragioni sperimentali: le prove sabbia su sabbia non hanno raggiunto la reale condizione a volume costante probabilmente a causa della migrazione di alcuni granelli di sabbia che, incuneandosi tra le due semiscatole, hanno prodotto un aumento delle tensioni tangenziali.

Nelle prove di interfaccia (Fig. 3.15b), la retta interpolatrice di stato critico ha pendenza definita dall'angolo di attrito  $\delta'_{cv|DS} \approx 34^\circ$ . Esso è rappresentativo della condizione a volume costante sperimentato dalle 4 prove e risulta unico, indipendente dal livello di addensamento iniziale del campione granulare e dalla rigidità  $k$  imposta [Tatsuoka 1985; Tabucanon et al. 1995; Ferrero 1996; Fioravante et al. 1999; Mortara 2001; Porcino et al. 2003]. Inoltre, come atteso, il valore  $\delta'_{cv|DS} \leq \phi'_{cv|DS}$ , con l'angolo di resistenza al taglio del materiale che costituisce il limite superiore dell'angolo di attrito all'interfaccia [Tatsuoka 1985; Uesugi e Kishida 1986; Porcino et al. 2003; Lings e Dietz 2005].

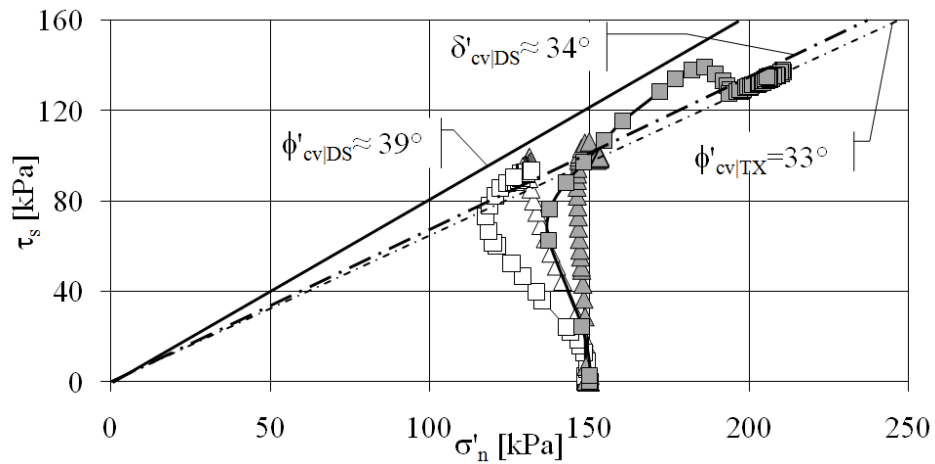


-Figura 3.14 - Prove DS-CNS sabbia su sabbia con  $\sigma'_{n0}=150$  kPa: (a) curve  $\tau_s - w$ , (b) curve  $\tau_s - \sigma'_m$  (c) curve  $u - w$ .

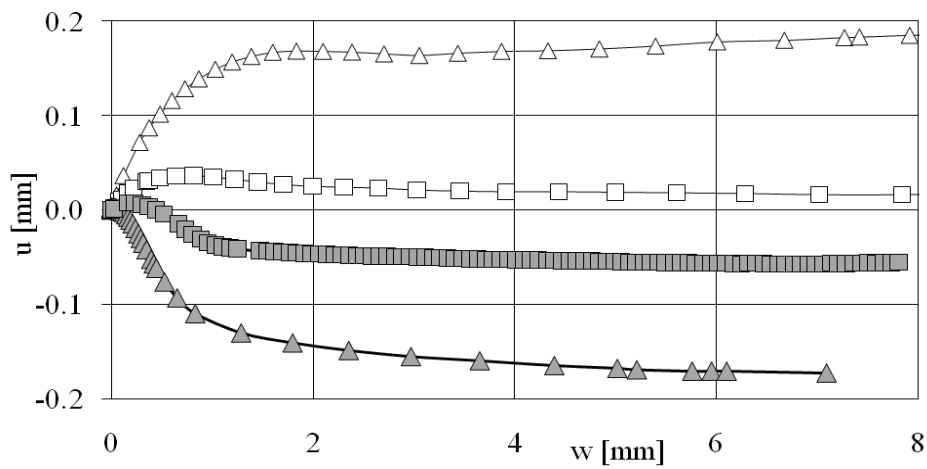




(a)



(b)



(c)

-Figura 3.15–Prove DS-CNS sabbia FF su piastra di  $R_n=0.6$  con  $\sigma'_{n0}=150$  kPa: (a) curve  $\tau_s - w$ , (b) curve  $\tau_s - \sigma'_n$ , (c) curve  $u - w$ .

### 3.4.2 EFFETTO DELLA TENSIONE INIZIALE $\sigma'_{n0}$

I risultati di 4 prove DS-CNS eseguite su provini di sola sabbia FF, ricostruiti a MD e HD, sono confrontati tra loro e, successivamente, con altrettante prove di interfaccia, condotte alle medesime condizioni al contorno ( $D_R$ ,  $k$ ,  $\sigma'_{n0}$ ), per analizzare gli effetti che la variazione della tensione normale iniziale produce sulla mobilitazione dell'attrito del materiale granulare.

Le caratteristiche delle prove selezionate sono riassunte in Tabella 3.4: esse differiscono per grado di addensamento e per tensione normale  $\sigma'_{n0}$  mentre sperimentano la stessa rigidità imposta  $k=1000$  kPa/mm.

| Prove DS-CNS             |                   | k=1000 kPa/mm         |                        |
|--------------------------|-------------------|-----------------------|------------------------|
|                          |                   | $\sigma'_{n0}=75$ kPa | $\sigma'_{n0}=150$ kPa |
| Sabbia FF -<br>Sabbia FF | MD $\approx 45\%$ | MD-FF-1000-75         | MD-FF-1000-150         |
|                          | HD $\approx 85\%$ | HD-FF-1000-75         | HD-FF-1000-150         |
| Sabbia FF –<br>$R_n=0.6$ | MD $\approx 45\%$ | MD-0.6-1000-75        | MD-0.6-1000-150        |
|                          | HD $\approx 85\%$ | HD-0.6-1000-75        | HD-0.6-1000-150        |

-Tabella 3.4 – Prove DS-CNS sabbia su sabbia e con interfaccia  $R_n=0.6$ , aventi  $k=1000$  kPa/mm.

In Figura 3.16 sono riportati alcuni risultati delle 4 prove eseguite su sola sabbia (Tab. 3.4), mentre in Figura 3.17 sono rappresentati quelli delle prove di interfaccia tra sabbia secca FF e la piastra avente  $R_n=0.6$  (Tab. 3.4).

Le curve di mobilitazione delle tensioni tangenziali (Figg. 3.16a e 3.17a) mostrano andamenti incrudenti per le prove a MD e per quelle ad HD su campioni di sola sabbia, mentre quelle di interfaccia su campioni densi risultano rammollenti.

In generale le tensioni tangenziali mobilitate dalle prove su sola sabbia sono superiori a quelle ottenute per le corrispondenti prove di interfaccia.

Nelle prove di interfaccia (Fig. 3.17a) un raddoppio di  $\sigma'_{n0}$  produce un raddoppio delle tensioni tangenziali di picco ad entrambe le densità relative esaminate. Al contrario nelle prove su sola sabbia (Fig. 3.16a) l'aumento della tensione normale iniziale produce degli incrementi variabili: a media densità la  $\tau_{su}$  aumenta del 180% al raddoppio di  $\sigma'_{n0}$ , mentre ad alta densità l'incremento è circa del 37%.

A parità di densità relativa, lo spostamento  $w_{su}$  a cui si mobilita la tensione tangenziale di picco appare indipendente da  $\sigma'_{n0}$ : lo sviluppo dell'attrito è più lento e progressivo nelle prove su sola sabbia, con valori

di picco mobilitati per  $w_{su} \geq 4$  mm, mentre il raggiungimento della  $\tau_s$  massima è più rapido per quelle di interfaccia che mobilitano  $\tau_{su}$  per  $w_{su} \approx 1-1.5$  mm.

Lo sviluppo delle tensioni tangenziali è accompagnato da un progressivo cambiamento delle tensioni normali  $\sigma'_n$ , come osservabile dai percorsi di carico mostrati in Figura 3.16b e 3.17b.

Ad entrambe le  $D_R$  i campioni analizzati mostrano una prima fase di riduzione delle  $\sigma'_n$ , più marcata per la minore tensione normale iniziale (Figg. 3.16b e 3.17b): a MD la riduzione di  $\sigma'_n$  rispetto al valore iniziale è circa il 40% di  $\sigma'_{n0}$  mentre ad HD è compresa tra il 20% e il 30% di  $\sigma'_{n0}$ .

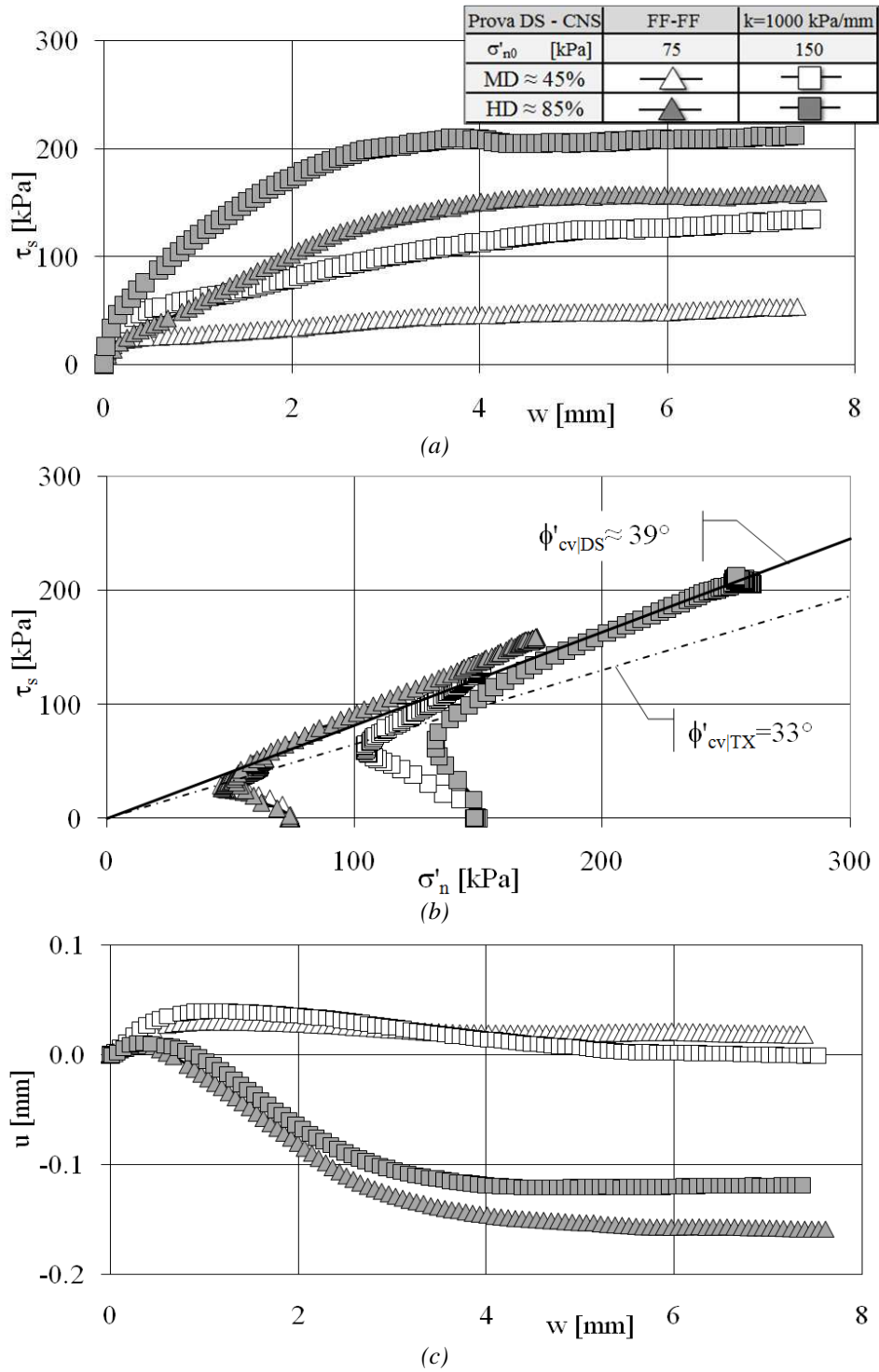
La riduzione di tensione normale è giustificata da una contrazione dei campioni per piccoli scorrimenti  $w$ , come osservabile nelle Figure 3.16c e 3.17c: la fase di contrazione è evidente in tutti i campioni testati ma è più accentuata per quelli a MD. In questa prima fase contraente il comportamento, a parità di condizioni al contorno, è lo stesso per le prove su sola sabbia e in quelle di interfaccia.

All'aumentare dello spostamento  $w$  il percorso tensionale dei campioni si modifica portando ad un aumento di  $\sigma'_n$  fino alla condizione di stato critico (Figg. 3.16b e 3.17b).

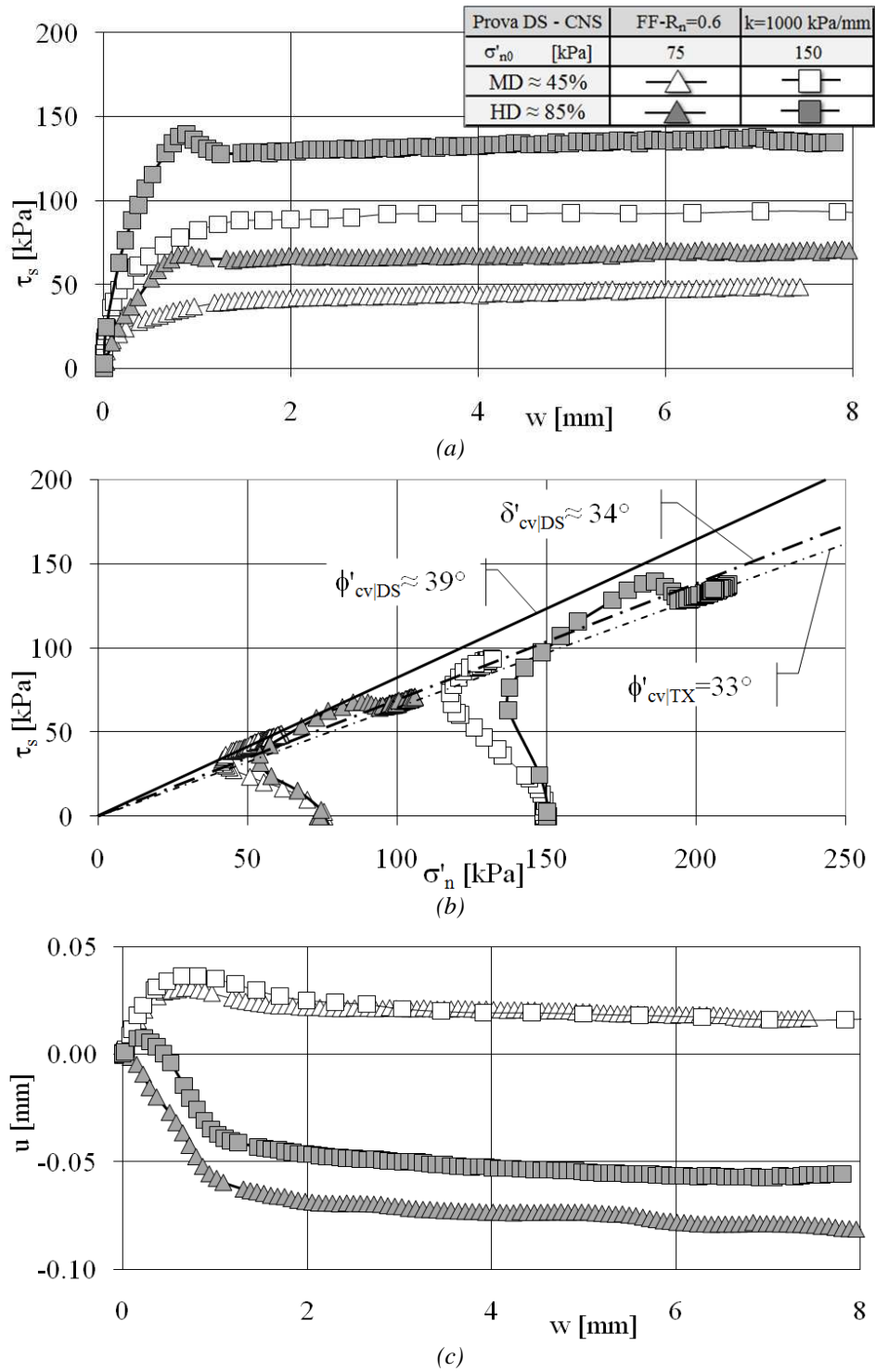
A MD l'incremento tensionale  $\Delta\sigma'_n$ , stimato rispetto al valore iniziale, è circa nullo per i campioni di sola sabbia, come confermato dagli andamenti  $u-w$  di Figura 3.16c, mentre è negativo per le prove di interfaccia con una riduzione di circa il 20% di  $\sigma'_{n0}$  per  $\sigma'_{n0}=75$  kPa e di circa il 13% di  $\sigma'_{n0}$  per la tensione di confinamento maggiore, in accordo con le curve  $u-w$  di Figura 3.17c.

Ad HD le prove di interfaccia mobilitano le tensioni tangenziali massime  $\tau_{su}$  con un incremento della tensione normale compreso tra il 13% e il 18% di  $\sigma'_{n0}$  (Fig. 5.17b), crescente con la pressione iniziale. In valore assoluto, l'incremento  $\Delta\sigma'_n$  è maggiore al crescere di  $\sigma'_{n0}$ . Per le prove su sola sabbia la  $\Delta\sigma'_n$ , valutata al picco  $\tau_{su}$  rispetto al valore iniziale, risulta circa il 130% per la  $\sigma'_{n0}=75$  kPa, mentre si riduce al 73% per la  $\sigma'_{n0}=150$  kPa. Anche per le prove su sola sabbia, l'incremento della tensione normale in valore assoluto è crescente con  $\sigma'_{n0}$ .

L'involuppo di rottura riferibile al raggiungimento della condizione di volume costante per le prove di interfaccia è caratterizzato dall'angolo di attrito  $\delta_{cv|DS} \approx 34^\circ$  (Fig. 3.17b): il risultato va a completare l'osservazione già riportata per la Figura 3.15b, confermando che la condizione a volume costante è unica, a parità di sabbia testata, e indipendente, oltre che dalla  $D_R$  e da  $k$ , anche dalla tensione iniziale  $\sigma'_{n0}$ .



-Figura 3.16 – Prove DS-CNS sabbia su sabbia con  $k=1000$  kPa/mm: (a) curve  $\tau_s - w$ , (b) curve  $\tau_s - \sigma'_n$  (c) curve  $u - w$ .



-Figura 3.17 - Prove DS-CNS sabbia FF su piastra di  $R_n=0.6$  con  $k=1000$  kPa/mm:  
 (a) curve  $\tau_s - w$ , (b) curve  $\tau_s - \sigma'_n$  (c) curve  $u - w$ .

Dall'analisi delle Figure 3.16c e 3.17c è infine osservabile che a MD le curve  $u-w$  dei campioni di sola sabbia e quelli con interfaccia si distinguono principalmente nella fase dilatante, che è maggiore per i primi, come precedentemente discusso. A HD la fase iniziale contraente si protrae per  $w$  maggiori nelle prove di sola sabbia che presentano una successiva fase dilatante marcatamente più accentuata raggiungendo, a parità di  $\sigma'_{n0}$ , valori di  $u$  doppi rispetto alle prove di interfaccia.

### **3.5 EFFETTI DELLA RUGOSITÀ NORMALIZZATA SU $\tau_{su}$ , $\tau_{cv}$ E $w_{su}$**

Per completare l'analisi degli effetti scala (Cap. 2) che possono condizionare la mobilitazione delle tensioni tangenziali dei pali modello testati in centrifuga, si valutano gli effetti di  $R_n$  sulla tensione tangenziale di picco,  $\tau_{su}$ , e a volume costante,  $\tau_{cv}$ , nonché sullo spostamento  $w_{su}$  necessario a mobilitare  $\tau_{su}$ .

Alle prove sabbia su sabbia è associata una  $R_n = 1$  anche se, a rigore, il concetto di rugosità normalizzata non può essere applicato in assenza di superficie di interfaccia. La media di questi valori è successivamente rappresentata da una linea tratteggiata, che vuole individuare il limite superiore per i rapporti  $\tau_s/\sigma'_n$  mobilitati dalle prove di interfaccia.

#### **3.5.1 EFFETTO DI $R_n$ SULLA TENSIONE TANGENZIALE $\tau_{su}$**

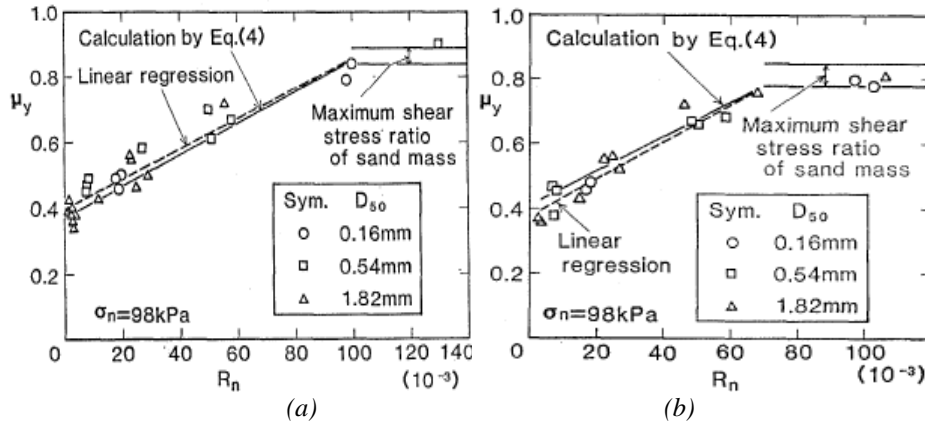
In Figura 3.18 sono riportati i risultati ottenuti da prove di taglio diretto a carico costante (DS-CNL,  $k=0$  kPa/mm) eseguite su due sabbie di diversa mineralogia e angolarità, ciascuna miscelata per ottenere differenti valori di  $D_{50}$  [Uesugi e Kishida 1986].

I rapporti tensionali al picco ( $\tau_{su}/\sigma'_n = \mu_y$ ), diagrammati in funzione della rugosità normalizzata, hanno evidenziato la presenza di un valore di  $R_n$  "critico" superato il quale  $\tau_{su}/\sigma'_n$  si mantiene circa costante, tendendo ad un limite superiore rappresentato dall'attrito mobilitato in prove di taglio diretto su sabbia.

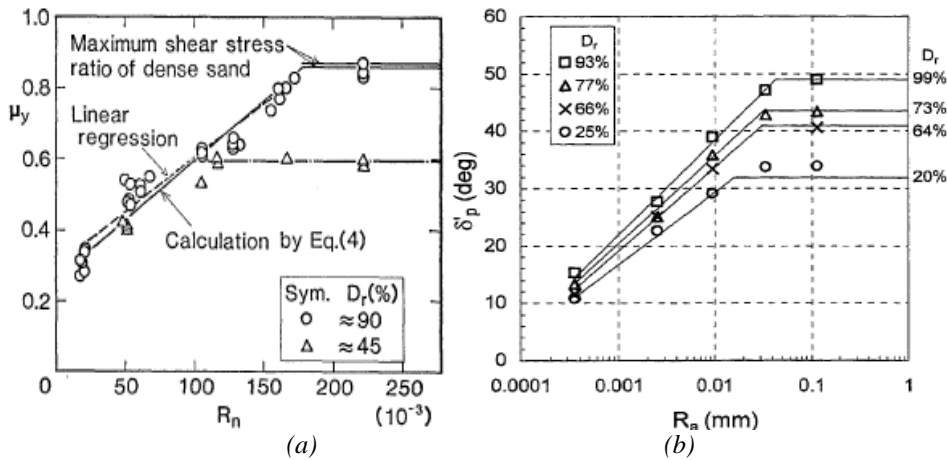
Il valore di  $R_n$  critico,  $R_{n|cr}$ , non è costante ma dipende dalle caratteristiche della sabbia testata: ad esempio, in Figura 3.18(a) si ha  $R_{n|cr} \approx 0.1$ , mentre in Figura 3.18(b)  $R_{n|cr} \approx 0.07$ .

Uesugi e Kishida [1986] e Lings e Dietz [2005] hanno rilevato la dipendenza della soglia critica dalla densità relativa: in particolare, a MD il valore di  $R_{n|cr}$  appare inferiore a quello raggiunto a HD. In Figura 3.19a sono riportati i dati ottenuti da prove DS-CNL su sabbia di Toyoura ( $D_{50}=0.19$  mm) ricostruita a due diverse densità relative, 45% e 90%,

riscontrando una variazione della  $R_{n|cr}$  da 0.1 (MD) a 0.17 (HD) [Uesugi e Kishida 1986]. Analogamente in Figura 3.19b i dati rappresentati sono ottenuti da prove DS-CNL eseguite su campioni di sabbia MGS ( $D_{50}=0.43$  mm) a densità relative comprese tra il 20% e il 99% [Lings e Dietz 2005]. Sebbene non sia possibile individuare un valore di  $R_{n|cr}$  da tali dati, in quanto gli autori forniscono una misura della rugosità superficiale media delle piastre,  $R_a$ , non conforme alla definizione di rugosità normalizzata di Uesugi e Kishida [1986], appare evidente una dipendenza dalla  $D_R$  dei rapporti tensionali al picco, rappresentati dai valori dell'angolo di attrito al picco  $\delta'_p$ .



-Figura 3.18 – Prove DS-CNL al variare di  $R_n$ : (a) Fujigawa sand; (b) Seto sand [da Uesugi e Kishida 1986].



-Figura 3.19 – Prove DS-CNL al variare di  $D_R$ : (a) da Uesugi e Kishida [1986]; (b) da Lings e Dietz [2005].

I risultati pubblicati da altri autori confermano i valori di tale soglia che può indicativamente essere compresa tra 0.05 e 0.5, in dipendenza da densità relativa, granulometria, mineralogia e rotondità dei grani [Paikowsky et al. 1995; Garnier e König 1998; Sarri 2001; Fioravante 2002; Garnier 2002; Ling e Dietz 2005].

In conclusione, l'interazione tra le particelle di sabbia e la superficie rugosa dell'inclusione, si modifica in funzione del valore di  $R_n$ , definendo tre intervalli di comportamento:

- $R_n < 0.02$  : l'interfaccia può essere considerata completamente liscia e le tensioni tangenziali, indipendenti da  $R_n$ , raggiungono valori molto bassi in quanto c'è completa assenza di dilatanza; la rottura avviene per scorrimento tra le particelle di sabbia e la superficie dell'inclusione liscia;
- $R_n > 0.1$  [Fioravante 2002] o  $R_n > 0.5$  [Paikowski 1995; Garnier 2002]: l'interfaccia può essere considerata completamente rugosa con mobilitazione di tensioni tangenziali elevate, non più dipendenti da  $R_n$ , dovute all'effetto della dilatanza. Lo scorrimento avviene all'interno della massa di terreno;
- $0.02 < R_n < 0.1$  [Fioravante 2002] o  $0.02 < R_n < 0.5$  [Paikowski 1995; Garnier 2002]: il comportamento all'interfaccia è intermedio tra i due precedentemente definiti e fortemente dipendente dal valore di  $R_n$ .

In Figura 3.20 i tre intervalli sono rappresentati diagrammando l'angolo di attrito, riferito al picco tensionale, rispetto a  $R_n$ : i dati sono ottenuti da prove di taglio diretto a carico costante e a rigidità normale imposta, eseguite con interfacce in alluminio di rugosità  $R_t$  crescente da 0.002 mm a 0.1 mm, poste a contatto con tre sabbie di diversa granulometria [Sarri 2001].

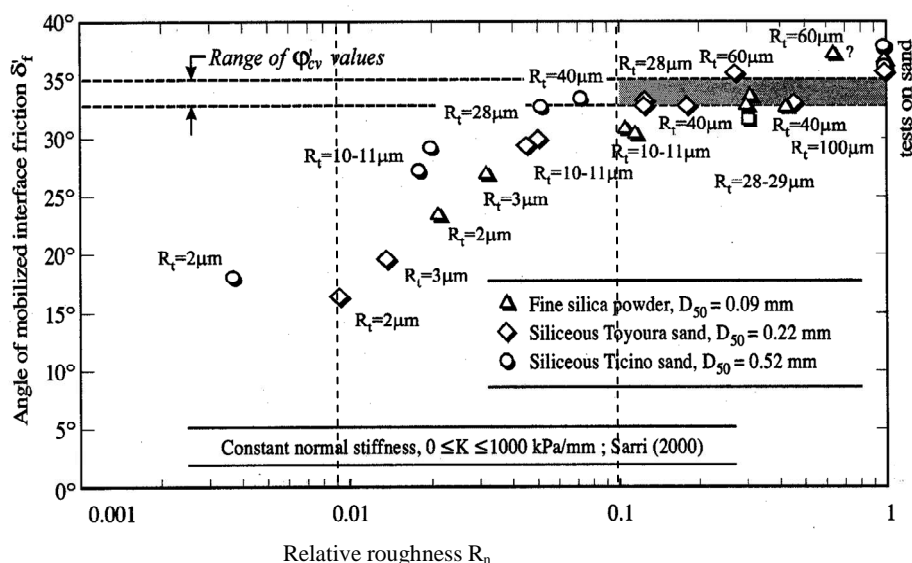
In Figura 3.21 sono diagrammati i rapporti  $\tau_{su}/\sigma'_n$  (con  $\sigma'_n$  tensione normale corrente in corrispondenza di  $\tau_{su}$ ), ricavati dai dati riassunti nelle Tabelle 3.1 e 3.2, in funzione della rugosità normalizzata, mantenendoli distinti per densità relativa del campione ricostruito (MD e HD) e per rigidità  $k$  imposta nella prova ( $k = 0-100-1000$  kPa/mm).

A parità di  $D_R$  e di  $k$ , i rapporti tensionali relativi a prove di interfaccia sono confrontati con quelli ottenuti da prove DS-CNS su provini di sola sabbia secca FF.

I risultati mostrati in Figura 3.21 hanno permesso di stimare la soglia critica della sabbia FF come  $R_{n|cr} \approx 0.2$ , sostanzialmente indipendente dal valore di rigidità imposto. Quindi i pali modello impiegati nella



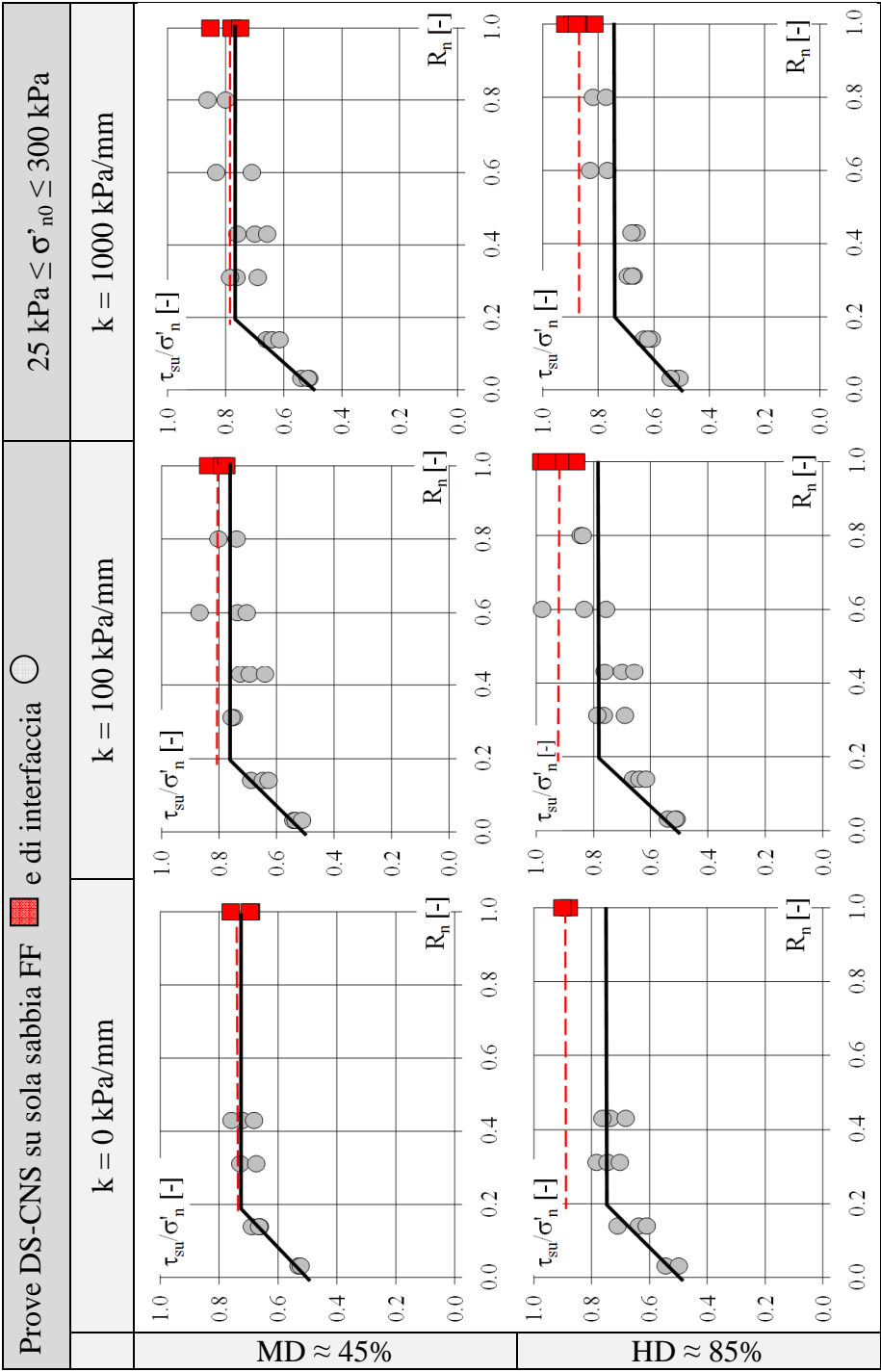
modellazione fisica in centrifuga non presentano l'effetto scala su  $\tau_{su}$  in quanto  $R_n \geq R_{n|cr}$ .



-Figura 3.20 – Risultati di prove di taglio diretto a rigidità normale imposta su tre tipologie di sabbia [Sarri 2001].

Inoltre, dai risultati graficamente presentati in Figura 3.21, non è evidenziabile la dipendenza della soglia critica dalla  $D_R$ : lo scarto tra  $R_{n|cr}$  stimato a media ed alta densità è minimo anche in ragione della relativa dispersione sperimentale dei dati acquisiti.

Nonostante gli elevati valori di  $R_n$  sperimentati dalle prove di interfaccia, in Figura 3.21 i rapporti tensionali al picco  $\tau_{su}/\sigma'_n$  sono risultati tendenzialmente minori di quelli ottenuti su sola sabbia. I dati reperiti in letteratura (Fig. 3.19) relativi a campioni a HD confermano la conclusione che  $\delta'_p \leq \phi'_p$ : per rugosità normalizzate superiori alla soglia critica, il valore di attrito registrato all'interfaccia si mantiene costante e inferiore al limite teorico delle prove su sabbia [Uesugi e Kishida 1986; Porcino et al. 2003; Lings e Dietz 2005].



-Figura 3.21 –Effetto  $R_n$ : confronto tra valori  $\tau_{su}/\sigma'_n$  ottenuti da prove DS-CNS, al variare della  $D_R$  e della  $k$  imposta.

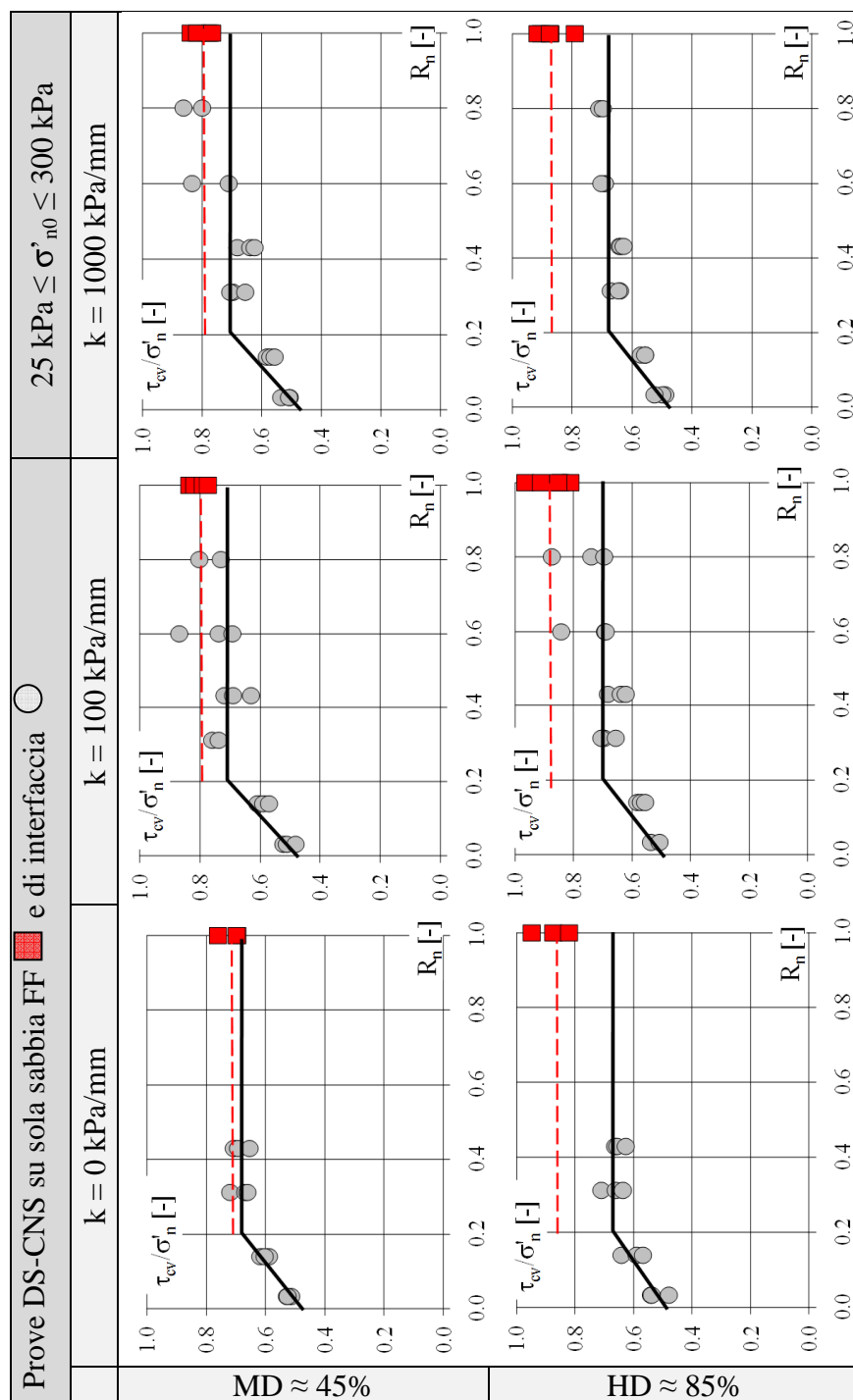
### 3.5.2 EFFETTO DI $R_n$ SULLA TENSIONE TANGENZIALE $\tau_{cv}$

Sono analizzati i risultati ottenuti diagrammando i rapporti  $\tau_{cv}/\sigma'_n$  (con  $\sigma'_n$  tensione normale corrente in corrispondenza di  $\tau_{cv}$ ), in funzione della rugosità normalizzata (Tabb. 3.1 e 3.2). Anche in questo caso i valori sono distinti in funzione della densità relativa e della rigidezza. I dati delle prove di interfaccia sono confrontati con quelli ottenuti da campioni di sola sabbia FF, sottoposti alle medesime  $D_R$  e  $k$ .

Dai grafici di Figura 3.22 è possibile osservare che il valore di rugosità normalizzata critica è ancora  $R_{n|cr} \approx 0.2$ , indipendente dalla densità relativa e dalla rigidezza imposta.

Anche a volume costante i rapporti tensionali ottenuti dalle prove su sola sabbia, che rappresentano  $\phi'_{cv|DS}$ , costituiscono un limite superiore per l'angolo di attrito  $\delta'_{cv|DS}$ . Lo scarto tra i due angoli a volume costante è minimo per i campioni a MD e per quelli a HD aventi le  $R_n$  maggiori.

Ai fini interpretativi dei risultati delle prove di carico su pali modello trivellati in sabbia FF appare quindi lecito assumere come angolo di attrito quello ottenuto a volume costante da prove di compressione triassiale corrispondente a  $\phi'_{cv|TX}=33^\circ$  stimato in condizione di deformazione assialsimmetrica, simile a quella che si genera attorno al fusto del palo caricato.



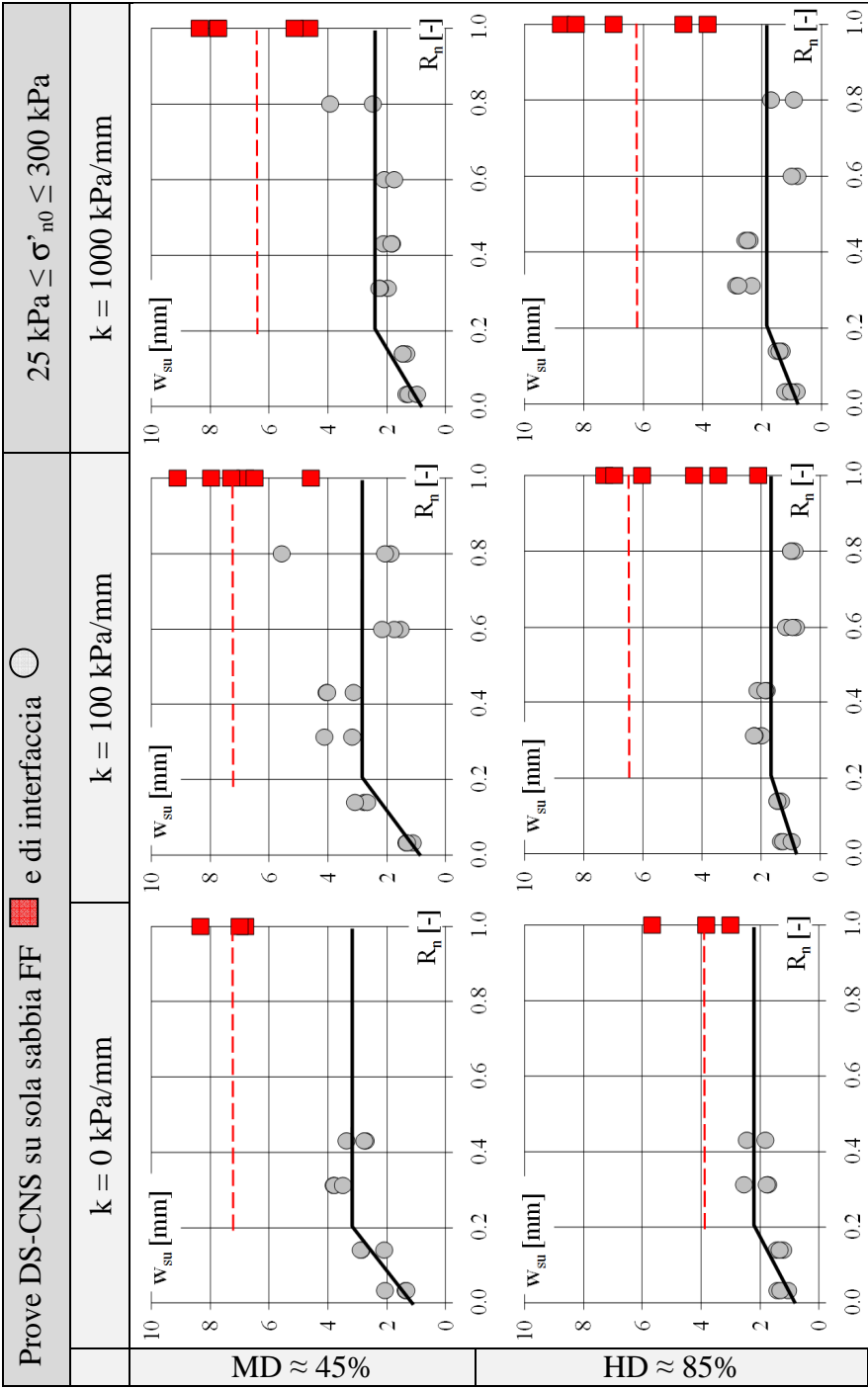
-Figura 3.22- Effetto  $R_n$ : confronto tra valori  $\tau_{cv}/\sigma'_n$  ottenuti da prove DS-CNS, al variare della  $D_R$  e della  $k$  imposta.

### 3.5.3 EFFETTO DI $R_n$ SULLO SPOSTAMENTO $w_{su}$

In Figura 3.23 sono riportati i valori dello spostamento  $w_{su}$  ottenuti dalle prove DS-CNS di interfaccia (Tab.3.2), distinti per  $D_R$  e  $k$  imposta. Nella stessa figura sono inoltre diagrammati i valori di  $w_{su}$  ricavati dalle prove di taglio condotte su campioni di sola sabbia FF nelle medesime condizioni di addensamento e rigidità (Tab. 3.1).

Dai risultati mostrati in Figura 3.23, la soglia di rugosità critica si conferma essere  $R_{n|cr} \approx 0.2$ : gli elementi che presentano una  $R_n$  maggiore sviluppano, a parità di condizioni al contorno, cedimenti indipendenti dalla scabrezza superficiale e in genere compresi tra 1.5 mm e 3.5 mm, decrescenti all'aumentare della rigidità e della densità relativa del campione di sabbia, aspetto quest'ultimo già rilevato nelle prove di carico in centrifuga (Cap. 2) che appaiono alla luce di queste considerazioni non condizionate dall'effetto scala indotto da  $R_n$ .

Confrontando, a parità di condizioni al contorno i valori di  $w_{su}$  ottenuti da prove DS-CNS su campioni di sola sabbia con quelli ricavati in presenza di interfaccia è possibile osservare una netta differenza: i  $w_{su}$  delle prime appaiono 2-3 volte maggiori rispetto a quelli sviluppati in prove con piastre rigide. La disuguaglianza è imputabile al differente meccanismo deformativo che si instaura a ridosso del piano di scorrimento imposto. In presenza di una piastra rigida rugosa, la zona di interfaccia, soggetta a grandi deformazioni volumetriche, si sviluppa internamente al campione di sabbia, al di sopra della piastra, e raggiunge rapidamente una situazione di picco tensionale per poi decrescere fino alla condizione di stato critico per grandi scorrimenti. Al contrario, nelle prove su sola sabbia la zona di interfaccia, responsabile della mobilitazione dell'attrito, è più estesa e si sviluppa sia sopra che sotto il piano di scorrimento: gli spostamenti dei granelli di sabbia dovuti a comportamenti deformativi dilatanti sono in genere molto più caotici e l'ingranamento necessario a raggiungere il picco tensionale richiede pertanto scorrimenti maggiori, giustificando i valori di  $w_{su}$  superiori.



-Figura 3.2.3– Effetto  $R_n$ : confronto tra valori  $w_{su}$  ottenuti da prove DS-CNS, al variare della  $D_R$  e della  $k$  imposta.

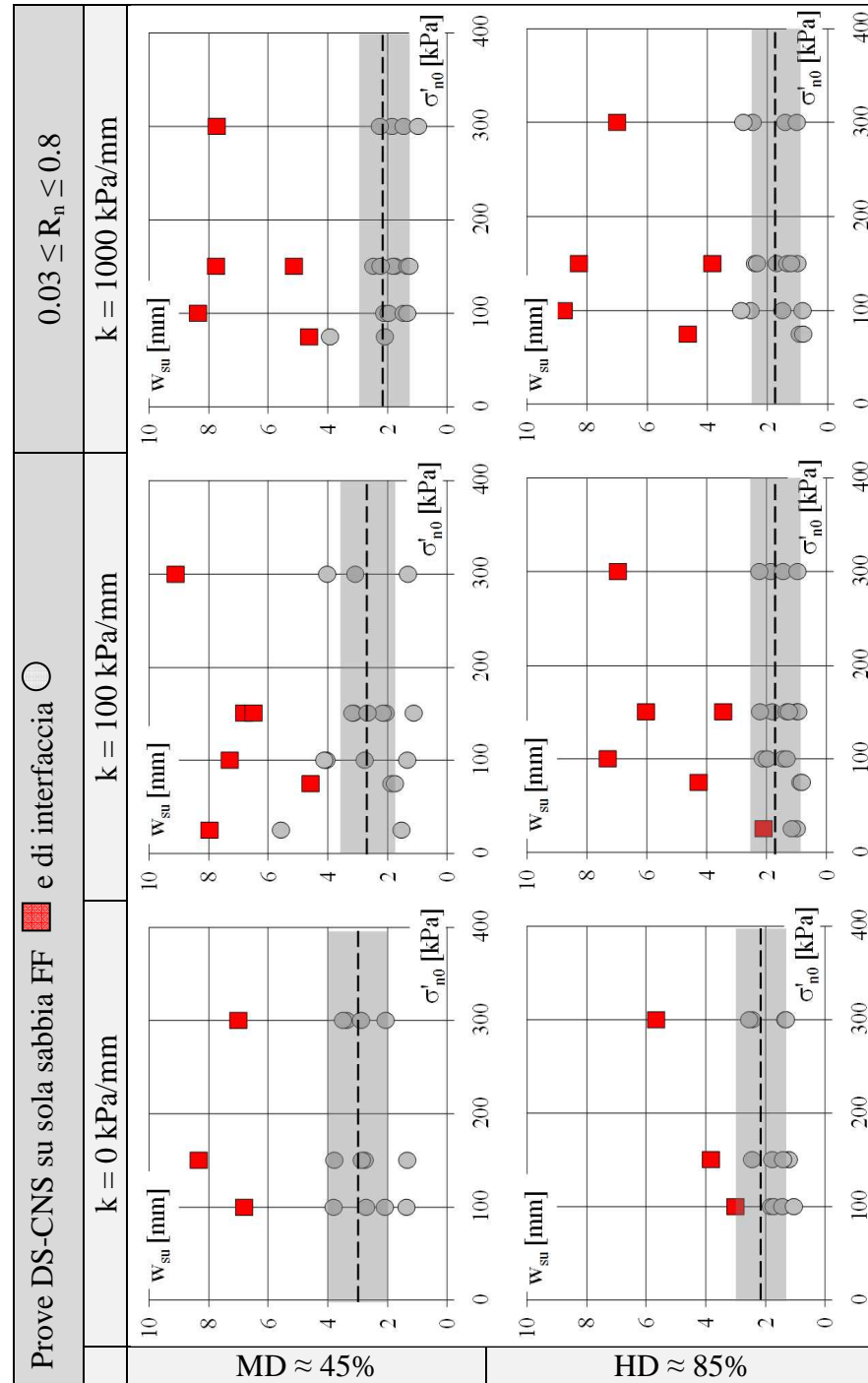
### 3.6 CONSIDERAZIONI SULLO SPOSTAMENTO $w_{su}$

I risultati ottenuti dall'elaborazione delle prove di taglio diretto a rigidezza normale imposta eseguite su sabbia secca FF riassunti in Figura 3.24, evidenziano che lo spostamento  $w_{su}$ , corrispondente alla mobilitazione della tensione tangenziale di picco, non è influenzato dalla  $\sigma'_{n0}$  di confinamento. I  $w_{su}$  sono rappresentati tenendo conto della rigidezza imposta  $k$  e della densità relativa dei campioni di sabbia FF. I valori ottenuti dalle prove di interfaccia sono poi confrontati con quelli ricavati da prove DS-CNS su campioni di sola sabbia testati nelle stesse condizioni di  $D_R$  e rigidezza.

Nonostante una certa variabilità sperimentale, per le prove di interfaccia non è possibile individuare una dipendenza di  $w_{su}$  dal valore di  $\sigma'_{n0}$ . Il risultato è in accordo con le evidenze sperimentali già discusse (Cap. 2) relativamente all'elaborazione delle prove di carico su pali modello in centrifuga.

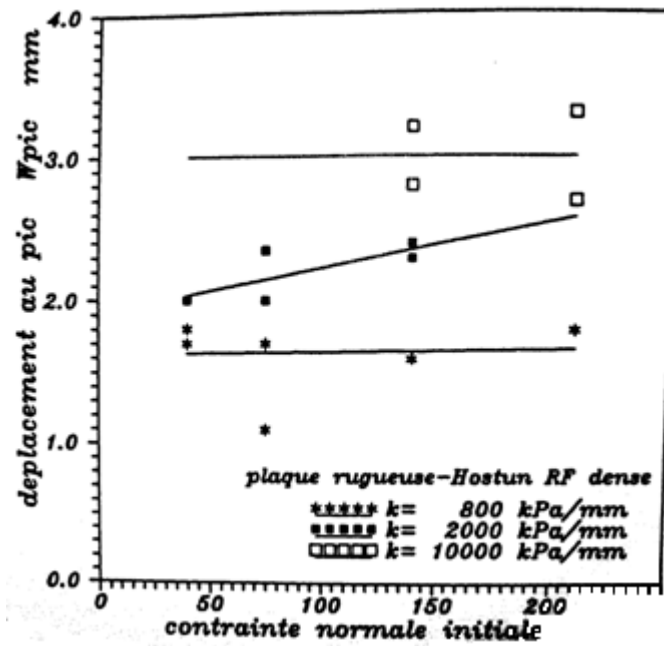
Analogamente Balachowski [1995], utilizzando i dati di una campagna di prove DS-CNS eseguite su sabbia Hostun ( $D_{50} = 0.32$  mm) a contatto con una piastra rugosa, conclude che  $w_{su}$  è indipendente dalla  $\sigma'_{n0}$  selezionata per la prova, come mostrato in Figura 3.25. Evidenzia tuttavia un significativo legame tra lo spostamento e la rigidezza normale imposta  $k$ , che indaga in un ampio campo, compreso tra 400 kPa/mm e 20000 kPa/mm, riportando il risultato mostrato in Figura 3.26. Tale effetto non è evidente nelle prove condotte su sabbia FF per l'intervallo di rigidezza compreso tra 0 e 1000 kPa/mm.

Dalle osservazioni riportate si può concludere che la densità relativa del campione di sabbia a contatto con l'inclusione e, probabilmente, la rigidezza normale alla superficie di scorrimento appaiono fattori condizionanti  $w_{su}$ . In particolare  $w_{su}$  decresce incrementando la densità relativa, come già evidenziato al Capitolo 2 dai risultati di prove di carico su pali modello testati in centrifuga.

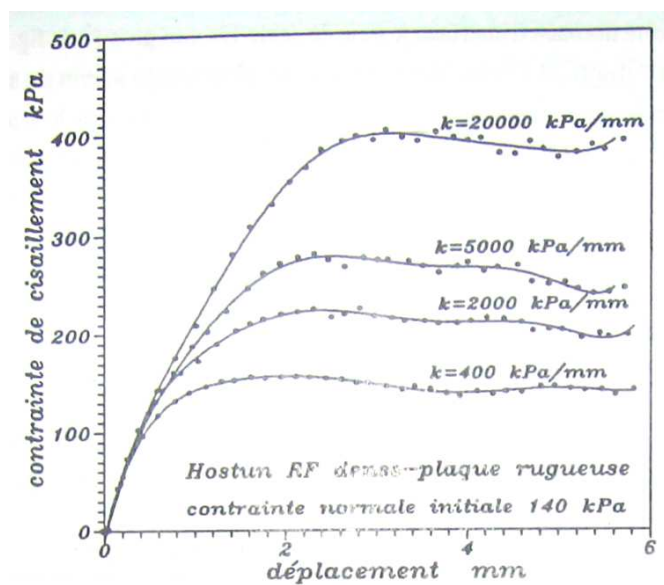


-Figura 3.24–Effetto  $\sigma'_{n0}$  : confronto tra valori  $w_{su}$  ottenuti da prove DS-CNS, al variare della  $D_R$  e della  $k$  imposta.





-Figura 3.25 – Spostamento  $w_{su}$  in funzione della tensione normale iniziale per 3 valori di rigidezza  $k$  imposta [Balachowski 1995].



-Figura 3.26 – Spostamento  $w_{su}$  in funzione della rigidezza normale imposta [Balachowski 1995].

### 3.7 CONSIDERAZIONI SULLA VARIAZIONE TENSIONALE $\Delta\sigma'_n$

Come commentato al Paragrafo 3.4, i campioni di sabbia addensata mostrano in genere un aumento di volume inversamente proporzionale alla tensione di confinamento e alla rigidità  $k$  imposta; tale incremento volumetrico produce un aumento  $\Delta\sigma'_n$  variabile.

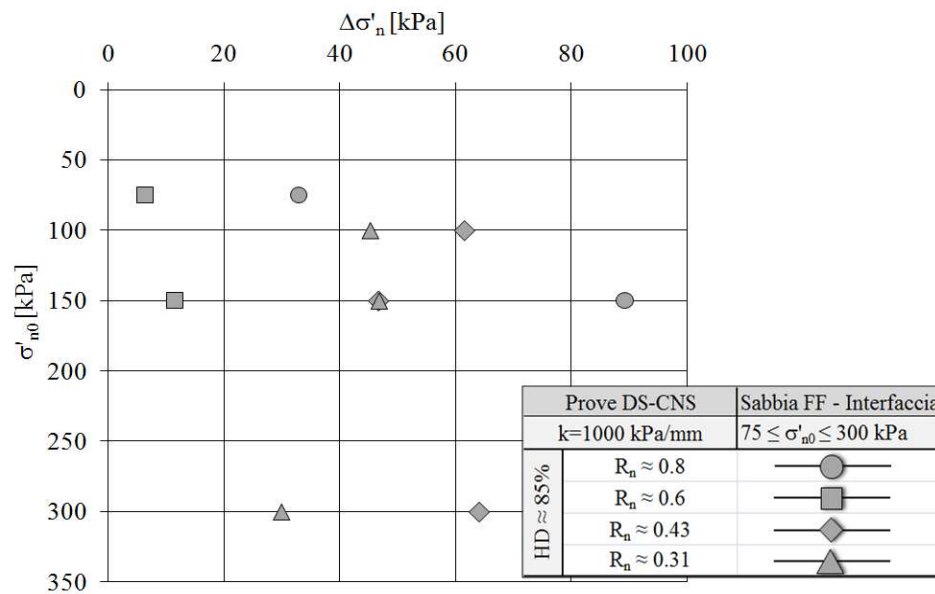
In Figura 3.27 sono mostrati gli incrementi tensionali raggiunti in corrispondenza di  $\tau_{su}$ , calcolati rispetto a  $\sigma'_{n0}$ , per le prove di interfaccia condotte su piastre con  $R_n > R_{n|cr}$  e con campioni di sabbia secca FF ricostruiti a HD aventi  $k$  imposta di 1000 kPa/mm (Tab. 3.2).

Dai risultati raccolti in Figura 3.27 non è individuabile un trend unico per i valori di  $\Delta\sigma'_n$  rispetto a  $\sigma'_{n0}$ . Per  $R_n \approx 0.6$  e  $R_n \approx 0.8$  gli incrementi tensionali aumentano con la pressione di confinamento. Per  $R_n \approx 0.4$   $\Delta\sigma'_n$  è funzione di  $\sigma'_{n0}$ : si osserva una iniziale riduzione per  $\sigma'_{n0} \leq 150$  kPa seguita da un successivo aumento per confinamenti maggiori. Al contrario, per  $R_n \approx 0.31$   $\Delta\sigma'_n$  prima aumenta per valori  $\sigma'_{n0} \leq 150$  kPa, mentre successivamente si riduce per confinamenti maggiori.

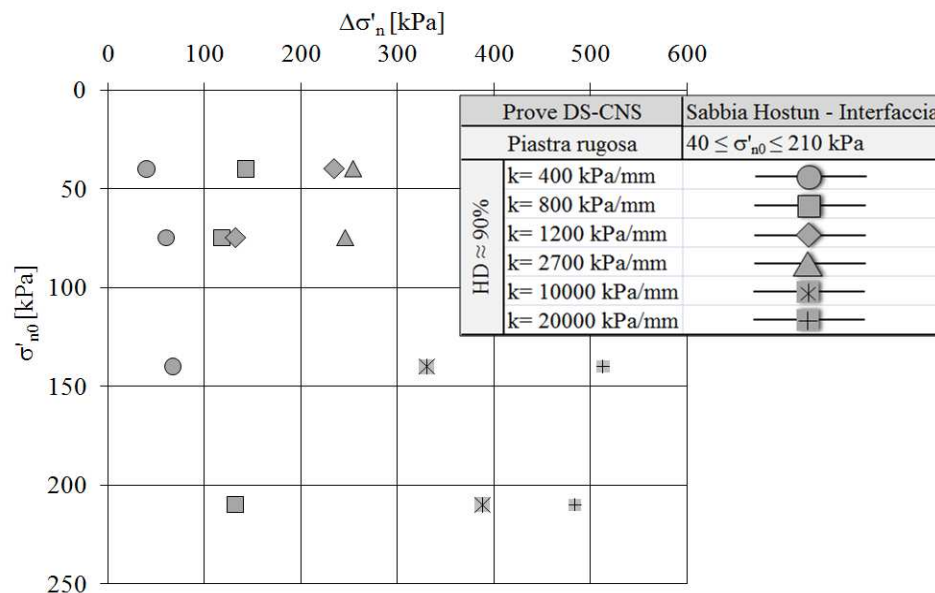
Risultati analoghi sono ottenuti da Balachowski [1995] interpretando le prove DS-CNS eseguite su piastra rugosa a contatto con sabbia secca Hostun, ricostruita ad alta densità e sottoposta a valori di  $k$  crescenti: i risultati sono mostrati in Figura 3.28 e fanno riferimento ai valori riportati dall'autore, raccolti in Tabella 3.5.

In conclusione, per i campioni di sabbia a HD l'aumento della pressione di confinamento produce una riduzione dello spostamento di dilatanza, con conseguente incremento  $\Delta\sigma'_n$  variabile in modo non sistematico con  $\sigma'_{n0}$ .

Dai risultati analizzati delle prove di interfaccia DS-CNS, sia su sabbia FF che Hostun ricostruite ad HD, è possibile confermare che per campioni di sabbia densa, *l'effetto della dilatanza* si riduce all'aumentare di  $\sigma'_{n0}$ , come mostrato nelle Figure 3.29 e 3.30 dove i rapporti  $\Delta\sigma'_n/\sigma'_{n0}$  appaiono, per ogni  $R_n$  e  $k$  considerata, sistematicamente decrescenti rispetto a  $\sigma'_{n0}$ .



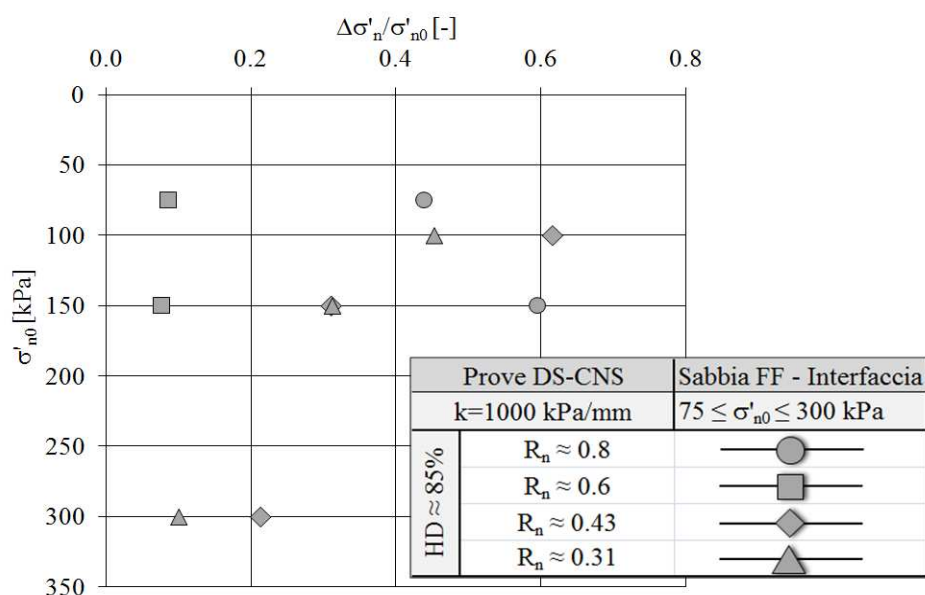
-Figura 3.27–Incrementi tensionali  $\Delta\sigma'_n$  rispetto a  $\sigma'_{n0}$  per prove di interfaccia DS-CNS su sabbia FF a HD con  $k=1000$  kPa/mm.



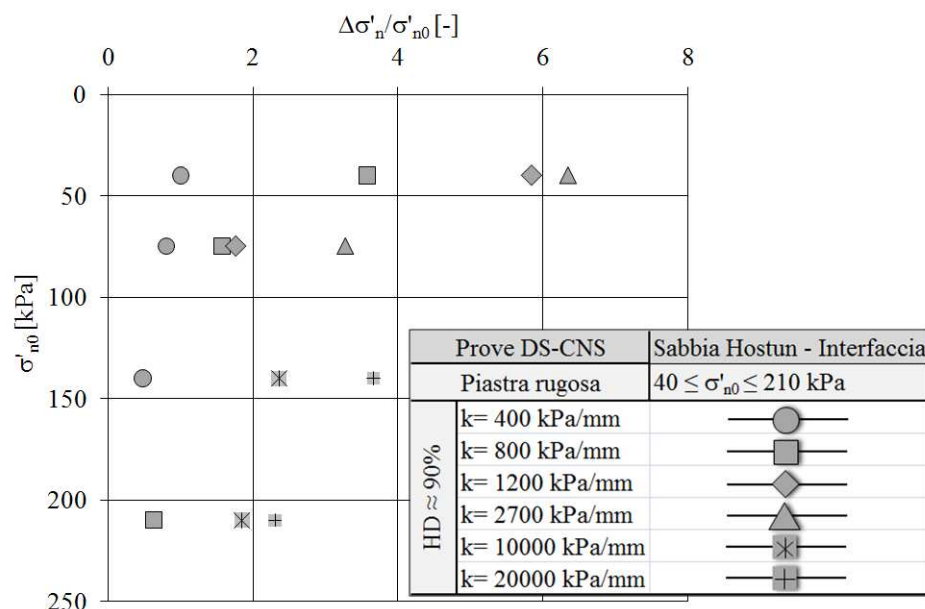
-Figura 3.28–Incrementi tensionali  $\Delta\sigma'_n$  rispetto a  $\sigma'_{n0}$  per prove di interfaccia DS-CNS su sabbia Hostun a HD [Balachowski 1995].

| Prove di interfaccia DS-CNS |                           |                  |                   |
|-----------------------------|---------------------------|------------------|-------------------|
| Sabbia Hostun               | D <sub>50</sub> = 0.32 mm | HD               | Piastra rugosa    |
| $\sigma'_{n0}$              | k                         | $\sigma'_{n su}$ | $\Delta\sigma'_n$ |
| [kPa]                       | [kPa/mm]                  | [kPa]            | [kPa]             |
| 40                          | 400                       | 80               | 40                |
| 40                          | 800                       | 183              | 143               |
| 40                          | 1200                      | 274              | 234               |
| 40                          | 2700                      | 294              | 254               |
| 75                          | 400                       | 135              | 60                |
| 75                          | 800                       | 193              | 118               |
| 75                          | 1200                      | 207              | 132               |
| 75                          | 2700                      | 321              | 246               |
| 140                         | 400                       | 207              | 67                |
| 140                         | 2000                      | 326              | 186               |
| 140                         | 10000                     | 470              | 330               |
| 140                         | 5000                      | 452              | 312               |
| 140                         | 20000                     | 653              | 513               |
| 210                         | 800                       | 342              | 132               |
| 210                         | 10000                     | 598              | 388               |
| 210                         | 20000                     | 694              | 484               |

-Tabella 3.5 – Prove di interfaccia DS-CNS su sabbia Hostun HD con piastra rugosa [Balachowski 1995].



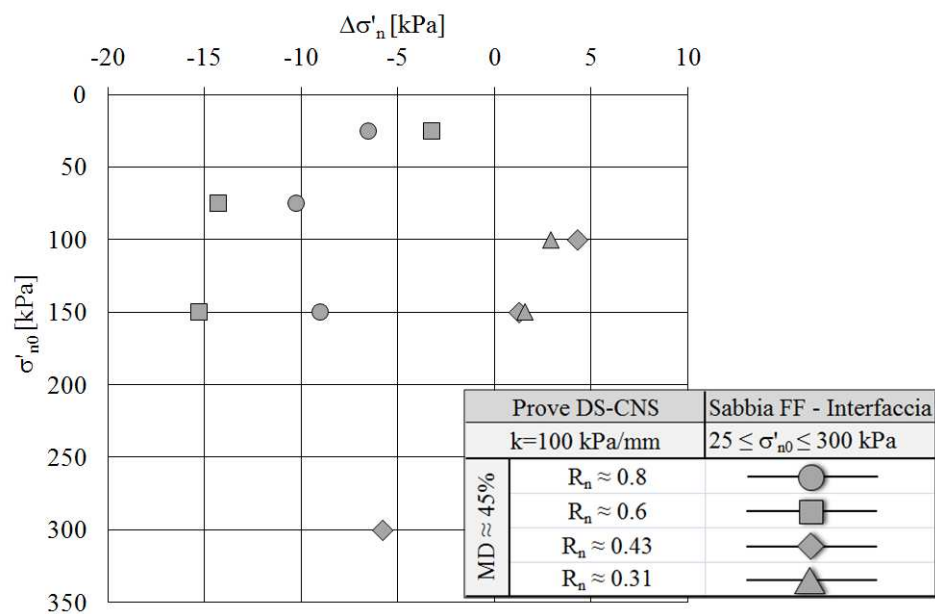
-Figura 3.29 – Rapporti tensionali  $\Delta\sigma'_n/\sigma'_{n0}$  rispetto a  $\sigma'_{n0}$  per prove di interfaccia DS-CNS su sabbia FF a HD con  $k=1000$  kPa/mm.



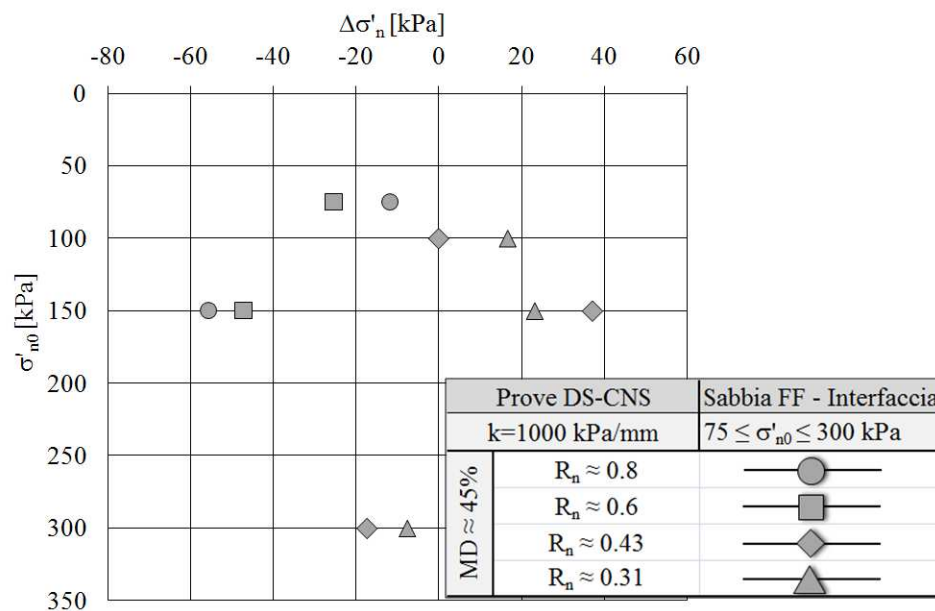
-Figura 3.30 –Rapporti tensionali  $\Delta\sigma'_n/\sigma'_{n0}$  rispetto a  $\sigma'_{n0}$  per prove di interfaccia DS-CNS su sabbia Hostun a HD [Balachowski 1995].

Per le prove DS-CNS condotte su campioni di sabbia secca FF ricostruita a MD i valori di  $\Delta\sigma'_n$ , associati al picco di tensione tangenziale e riferiti a  $\sigma'_{n0}$ , sono in genere negativi, coerentemente con il comportamento contraente descritto al Paragrafo 3.4. I punti rappresentanti questi valori sono diagrammati in Figura 3.31, per la rigidezza imposta  $k=100$  kPa/mm, e in Figura 3.32 per  $k=1000$  kPa/mm. I dati fanno riferimento alle prove a MD riassunte in Tabella 3.2 aventi  $R_n > R_{n|cr}$ .

Anche per i campioni a media densità,  $\Delta\sigma'_n$  presenta andamenti variabili al crescere delle pressione di confinamento iniziale.



-Figura 3.31–Variazioni tensionali  $\Delta\sigma'_n$  rispetto a  $\sigma'_{n0}$  per prove di interfaccia DS-CNS su sabbia FF a MD con  $k=100$  kPa/mm.



-Figura 3.32–Variazioni tensionali  $\Delta\sigma'_n$  rispetto a  $\sigma'_{n0}$  per prove di interfaccia DS-CNS su sabbia FF a MD con  $k=1000$  kPa/mm.

## CAPITOLO 4

---

### VALUTAZIONE DELL'ATTRITO LATERALE

---

#### 4.1 INTRODUZIONE

I metodi per la determinazione dell'attrito laterale unitario mobilitato su un palo di fondazione possono essere distinti in due classi:

- Metodi indiretti: sono basati sulle proprietà fondamentali del terreno, come resistenza al taglio, densità relativa e rigidezza;
- Metodi diretti: sono basati sulle misure eseguite in sito, come le prove penetrometriche, statiche e dinamiche, e quelle pressiometriche.

La difficoltà di prelevare campioni indisturbati di materiali incoerenti porta alla frequente necessità di stimare i parametri di resistenza del terreno impiegando prove in sito e correlazioni empiriche, preferendo quindi l'applicazione dei metodi di tipo diretto. Tuttavia, anche questi ultimi presentano però delle incertezze in quanto la modalità di realizzazione del palo può produrre sostanziali alterazioni nel deposito attraversato che sviluppa un comportamento meccanico diverso da quello ipotizzabile sulla base dei risultati delle prove, condotte sul terreno naturale.

A fronte di tali limitazioni, la prova di carico appare l'unica soluzione in grado di fornire valori di resistenza affidabili [Mandolini 1995; Bowles 1998; Lancellotta e Calavera 1999].

Rimane tuttavia necessario disporre di strumenti di previsione il più accurati ed attendibili possibile per dimensionare in fase preliminare il palo da realizzare.

Il fenomeno che regola l'interazione tra il fusto del palo ed il terreno sabbioso circostante è assai complesso, come discusso ai Capitoli 2 e 3, e controllato da un gran numero di fattori.

In generale la portata per attrito laterale ultima,  $Q_{su}$ , è valutata come:

$$Q_{su} = \pi D \int_0^L \tau_{su} dz \quad [F] \quad (4.1)$$

Con:

D, L = diametro e lunghezza del palo immersa nel terreno

$\tau_{su}$  = attrito laterale unitario ultimo o di picco

La determinazione della tensione tangenziale unitaria al picco appare quindi di fondamentale importanza per la stima della portata laterale di un palo di fondazione immerso in terreno granulare.

L'approccio detto di "*spinta del terreno*" [Burland 1973; Reese e O'Neill 1988; Chen e Kulhawy 1994] prevede la stima di  $\tau_{su}$  attraverso la formula empirica:

$$\tau_{su} = \sigma'_{n|su} \tan \delta' = K \sigma'_{v0} \tan \delta' \quad [FL^{-2}] \quad (4.2)$$

Con:

$\sigma'_{n|su}$  = tensione efficace media normale al fusto del palo agente al momento della mobilitazione di  $\tau_{su}$

$\delta'$  = angolo di attrito mobilitato all'interfaccia palo-terreno

K = coefficiente di spinta del terreno, fattore empirico che correla  $\sigma'_{n|su}$  a  $\sigma'_{v0}$

$\sigma'_{v0}$  = tensione efficace verticale geostatica

La determinazione di valori rappresentativi ed affidabili per K e  $\delta'$  è di cruciale importanza per una corretta applicazione dell'approccio, ma la loro forte variabilità in funzione delle condizioni al contorno (metodo di installazione e modalità esecutive del palo, caratteristiche del deposito) rende spesso i valori di  $\tau_{su}$  stimati poco significativi.

#### 4.1.1 METODO $\beta$

Dall'approccio di "*spinta del terreno*" deriva il "*metodo  $\beta$* " comunemente impiegato nella pratica progettuale per la stima della tensione unitaria laterale di pali installati in sabbia:

$$\tau_{su} = \beta \sigma'_{v0} \quad [FL^{-2}] \quad (4.3)$$

Con:

$\beta = K \tan \delta' =$  fattore di trasferimento dell'attrito laterale

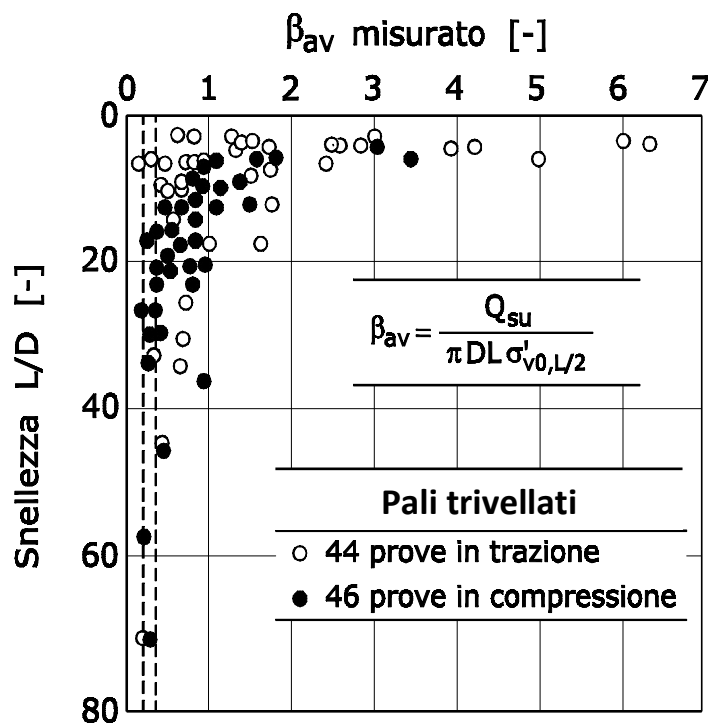
Il coefficiente  $\beta$  tiene conto implicitamente e contemporaneamente dei fattori che controllano la mobilitazione dell'attrito:



- stato iniziale del terreno sabbioso: densità relativa, tensioni geostatiche efficaci verticale ed orizzontale, eventuale struttura del terreno;
- cambiamento dello stato del terreno a seguito dell'installazione del palo;
- modalità di esecuzione del palo: tipologia di palo, sostegno del foro, fluidità del calcestruzzo, tempo impiegato per l'installazione;
- variazione della tensione normale al fusto durante la fase di carico;
- rugosità all'interfaccia palo-terreno;
- resistenza al taglio e rigidità del terreno circostante il palo.

Per questa sua complessità il coefficiente di trasferimento del carico è spesso determinato da analisi a ritroso di risultati di prove di carico eseguite su pali in vera grandezza strumentati, e il metodo  $\beta$  può essere considerato un metodo empirico, i cui valori sono dipendenti dalle condizioni al contorno delle prove analizzate.

Chen e Kulhawy [1994] interpretando circa 90 prove di carico su pali in vera grandezza trivellati in sabbie e ghiaie, hanno calcolato i valori di  $\beta$  medi mostrati in Figura 4.1, rappresentati in funzione della snellezza del palo,  $L/D$ .



*-Figura 4.1 - Coefficiente di attrito laterale medio al variare della snellezza per pali trivellati in terreni granulari [Chen e Kulhawy 1994].*

Reese e O'Neill [1988] e O'Neill e Hassan [1994] hanno proposto due formule analitiche per la stima del coefficiente  $\beta$ , funzione solamente della profondità di calcolo  $z$ :

$$\beta = 1.5 - 0.42z^{0.34} \quad \text{sabbie} \quad [-] \quad (4.4)$$

$$\beta = 1.5 - 0.42z^{0.34} \quad \text{sabbie ghiaiose e ghiaie} \quad [-] \quad (4.5)$$

La (4.4) e la (4.5) sono valide solamente nel caso di  $N_{SPT} \geq 15$  colpi/piede ( $N_{SPT}$  = numero di colpi determinati da una prova penetrometrica dinamica SPT - Standard Penetration Test) e comunque per valori di  $\beta$  compresi negli intervalli  $0.25 \leq \beta \leq 1.2$  per le sabbie e  $0.25 \leq \beta \leq 1.8$  per le sabbie ghiaiose e ghiaie.

#### 4.1.2 METODO DIRETTI

In riferimento ai dati di una prova SPT, è possibile utilizzare la correlazione proposta da Gwizdala [1984] per stimare la tensione tangenziale di picco di pali trivellati in sabbie di granulometria media e grossolana. L'autore distingue le espressioni di  $\tau_{su}$  in funzione del tipo di rivestimento utilizzato per sostenere il foro:

scavo con rivestimento provvisorio

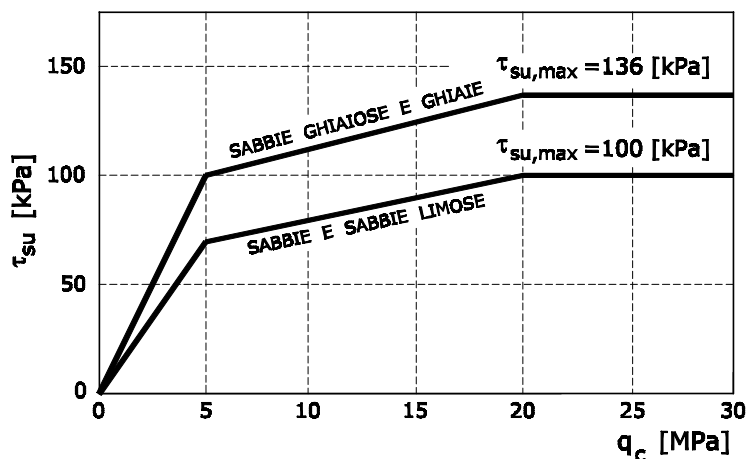
$$\tau_{su} = 1.8 N_{SPT} \quad [\text{kPa}] \quad \text{con } \tau_{su} \leq 90 \text{ kPa} \quad (4.6)$$

scavo con fango di perforazione

$$\tau_{su} = 3.0 N_{SPT} \quad [\text{kPa}] \quad \text{con } \tau_{su} \leq 150 \text{ kPa} \quad (4.7)$$

E' possibile stimare la tensione tangenziale di picco in funzione del valore di  $q_c$  (resistenza alla punta di una prova CPT - Cone Penetration Test) utilizzando l'abaco di Alsamman [1995], mostrato in Figura 4.2.

Ulteriori correlazioni basate sui dati misurati in una prova CPT possono essere reperiti in Bustamante e Ghaneselli [1982], Van Impe et al. [1988].



-Figura 4.2– Correlazione  $q_c - \tau_{su}$  per pali trivellati interreni granulari [Alsamman 1995].

#### 4.1.3 METODO INDIRETTI

Negli ultimi decenni alcune ricerche si sono concentrate sull'approfondimento del meccanismo di mobilitazione dell'attrito utilizzando prove di taglio diretto a rigidità normale imposta (Cap. 3), simulazioni numeriche [Boulon e Foray 1986; Boulon 1988; De Nicola e Randolph 1993; Sarri 2001; Colombi 2005] e prove di carico su pali modello in scala ridotta, eseguite in centrifuga geotecnica e in camere di calibrazione [Jardine et al. 1993; Lehane et al. 1993; Craig e Sabagh 1994; Turner e Kulhawy 1994; Balachowski 1995; Chow 1997; Al-Mhaidib e Edil 1998; Foray et al. 1998; Garnier e König 1998; Rezende et al. 1998; De Nicola e Radolph 1999; Sarri 2001; Garnier 2002; Fioravante 2002; Colombi 2005; Lehane e White 2005; Lehane et al. 2005].

In particolare Jardine et al. [1993], Lehane et al. [1993] e Chow [1997] hanno eseguito prove di carico su un palo modello strumentato in grado di misurare la  $\sigma'_n$  agente in direzione normale al fusto: la ricerca, condotta su un palo di piccole dimensioni, che prende il nome di "Imperial College Pile", è eseguita infiggendolo in terreno granulare e sollecitandolo in trazione e compressione.

Dall'interpretazione dei risultati ottenuti dalla sperimentazione, Jardine e Chow [1996] hanno proposto una legge analitica per la stima di  $\tau_{su}$  che assume implicitamente la validità del modello di Wernick [1978], presentato al Capitolo 3:

$$\tau_{su} = \sigma'_{n|su} \tan \delta_{cv} = (\sigma'_{nc} + \Delta \sigma'_n) \tan \delta_{cv} \quad [FL^{-2}] \quad (4.8)$$

Con:

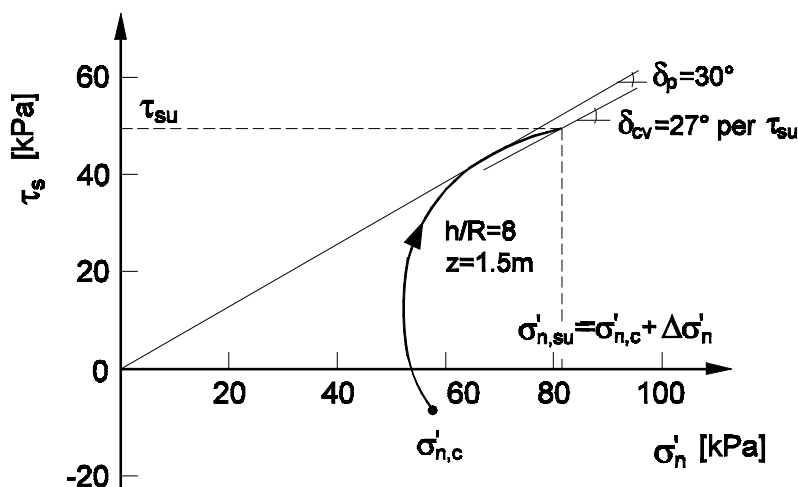
$\delta_{cv}$  = angolo di attrito all'interfaccia a volume costante

$\sigma'_{nc}$  = tensione normale efficace media agente sul fusto del palo dopo l'installazione

$\Delta\sigma'_n$  = variazione della tensione normale al fusto prodotta dal carico

L'assunzione dell'esistenza di un angolo di attrito in condizione di volume costante per il calcolo della tensione tangenziale di picco deriva da evidenze sperimentali: in Figura 4.3 è mostrato un tipico percorso tensionale ottenuto dal palo strumentato dell'Imperial College, infisso in sabbia medio-fine di Lebanne [Lehane et al. 1993; Lehane e Jardine 1994]. Le tensioni tangenziali crescono fino a toccare l'involuppo di picco per poi aumentare ulteriormente (Fig. 4.3): i valori massimi di entrambe le tensioni sono raggiunti in corrispondenza della condizione di volume costante, da cui l'assunzione di  $\delta_{cv}$  nella (4.8) [Lehane et al. 2005].

Per la determinazione di  $\Delta\sigma'_n$  da utilizzare nella (4.8) evidenze sperimentali precedentemente discusse (Cap. 2) [Wernich 1978; Boulon e Foray 1986; Johnston 1987; Boulon 1988; Lehane et al. 1993; Chow et al. 1997] suggeriscono l'impiego di una formulazione mutuata dalla teoria della cavità espansa (eq.ne 2.17). Da essa,  $\Delta\sigma'_n$  appare funzione diretta della rigidezza del terreno, espressa dal modulo di taglio  $G$ , e dello spostamento radiale al palo  $\Delta y$ , mentre risulta inversamente proporzionale al diametro  $D$  del palo.



-Figura 4.3 – Percorso tensionale ottenuto dall'Imperial College Pile infisso in sabbia di Lebanne [Lehane et al. 1993].

Nel seguito si discutono alcuni approcci per la stima di  $\Delta\sigma'_n$  e di  $\tau_{su}$ , testando la validità dei valori ottenuti utilizzando le tensioni tangenziali di picco ricavate dalle prove di carico su pali rugosi trivellati in sabbia secca FF eseguite in centrifuga.

#### **4.2 DETERMINAZIONE DI $\Delta\sigma'_n$ DALLA TEORIA DELLA CAVITÀ ESPANSA**

Boulon e Foray [1986] studiando prove di interfaccia DS-CNS e prove pressiometriche in camera di calibrazione, hanno stabilito una correlazione per la stima di  $\Delta\sigma'_n$  basata sulla teoria della cavità espansa.

Essi hanno studiato il comportamento di un palo trivellato rigido di raggio  $R_0$ , installato in una sabbia caratterizzata da un modulo pressiometrico  $E_p$ ; lo spessore della banda di taglio sviluppata per grandi scorrimenti è pari a  $y$  (con  $y \ll R_0$ ). Durante la sollecitazione assiale, a ridosso del palo si generano due meccanismi: il primo di taglio diretto, dovuto allo scorrimento palo-terreno, il secondo “pressiometrico”, legato alle piccole deformazioni radiali  $\Delta y$  della zona di interfaccia. L'equilibrio statico della zona terreno-interfaccia è espresso da:

$$\frac{\sigma'_n - \sigma'_{n0}}{\Delta y} = \frac{\Delta\sigma'_n}{\Delta y} = \frac{2E_p}{R_0} = k \quad [FL^{-2}L^{-1}] \quad (4.9)$$

Con:

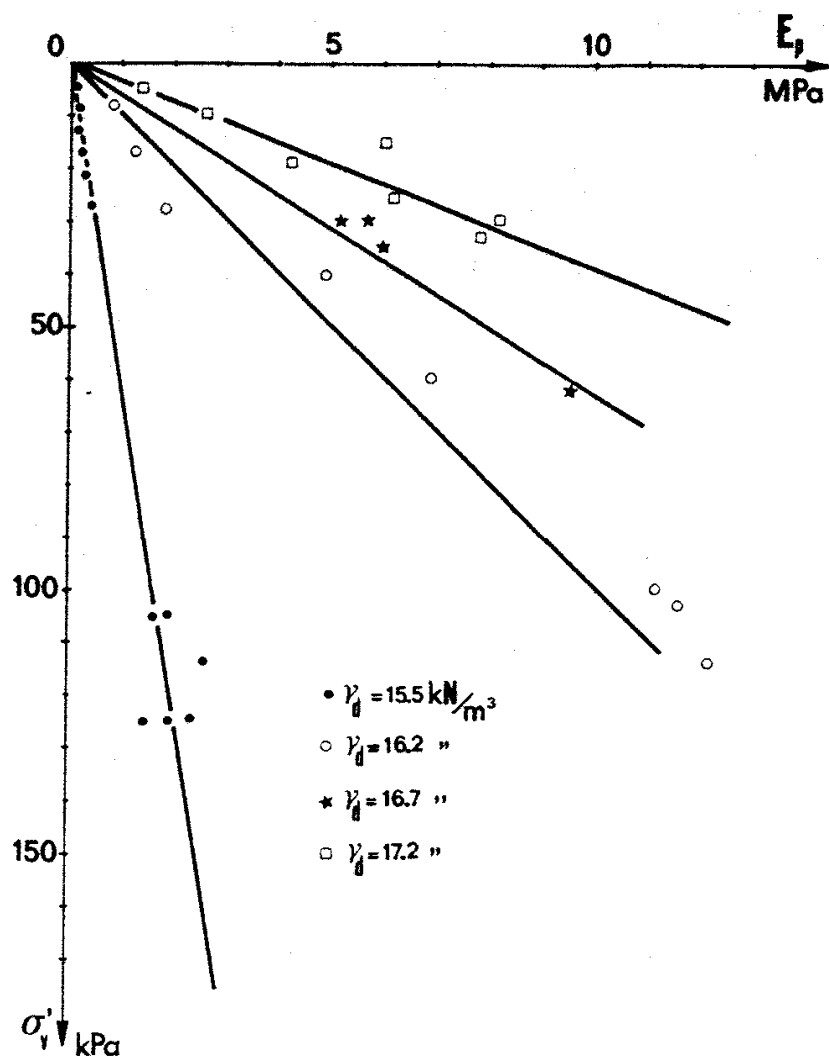
$\sigma'_n$  = tensione efficace corrente normale all'interfaccia

$\sigma'_{n0}$  = tensione efficace iniziale normale all'interfaccia

$\Delta\sigma'_n$  = variazione di tensione efficace normale all'interfaccia

$k$  = rigidezza normale imposta all'interfaccia

In Figura 4.4 sono mostrati gli andamenti di  $E_p$  al variare della densità relativa e della pressione verticale imposta al deposito sabbioso di prova  $\sigma'_{v0}$ : in particolare, a parità di  $D_R$ , si riscontra una diretta proporzionalità del modulo pressiometrico da  $\sigma'_{v0}$ , mentre a parità di confinamento,  $E_p$  aumenta con il grado di addensamento.



-Figura 4.4 – Variazione del modulo pressometrico  $E_p$  con la tensione efficace verticale  $\sigma'_{v0}$  e la densità relativa [Boulon e Foray 1986]

Successivamente, Lehane et al. [1993] hanno suggerito l'applicazione del modulo di taglio,  $G$ , per determinare la rigidità del terreno all'interfaccia, secondo la formula (2.17).

Per la determinazione di  $\Delta\sigma'_n$  dall'approccio da cavità espansa è quindi necessario stimare il valore del modulo  $G$ , definito valore operativo, ottenuto dalla curva di decadimento del modulo di taglio in corrispondenza della deformazione tagliante sviluppata per mobilitare  $\tau_{su}$ , e la corrispondente entità della deformazione radiale dell'interfaccia,  $\Delta y$ .

Per deformazioni minori di  $10^{-5}$ , il valore di  $G$  può essere considerato costante e pari a  $G_0$ , modulo di taglio tangente in campo elastico, mentre all'aumentare della deformazione il modulo  $G$  subisce un decadimento.

In condizioni di esercizio il livello deformativo raggiunto dal terreno è dell'ordine di  $10^{-4}$ - $10^{-3}$  [Lancellotta 2004; Yang 2006].

In generale, ai fini progettuali, è possibile stimare  $G$  come una percentuale di  $G_0$ , utilizzando correlazioni reperibili in letteratura.

Poulos et al. [2001] suggeriscono di fissare come limite inferiore di  $G$ :

$$G=0.3 G_0 \quad [FL^{-2}] \quad (4.10a)$$

Deeks et al. [2005] trovano buon accordo tra dati misurati e calcolati di capacità portante di pali in vera grandezza trivellati ed infissi staticamente in sabbia, applicando  $G$  pari a:

$$G=0.5 G_0 \quad [FL^{-2}] \quad (4.10b)$$

In Fahey et al. [2003] si indica come valore operativo di  $G$ :

$$G=0.4 G_0 \quad [FL^{-2}] \quad (4.10c)$$

Assumendo una deformazione di taglio della zona di interfaccia del palo pari a circa  $10^{-3}$ , la curva di decadimento del modulo di Young mostrata in Figura 1.9 per la sabbia FF, fornisce un rapporto di 0.4.

Le indicazioni reperite in letteratura appaiono quindi concordi nel definire il rapporto  $G/G_0 \approx 0.4$ , assunto nelle successive elaborazioni.

La correlazione (1.12), presentata nel Capitolo 1 (Par.1.4), tarata su campioni di sabbia FF sottoposti a prove triassiali con bender elements, è utilizzata per stimare il modulo  $G_0$  al variare dell'indice dei vuoti iniziale e dello stato tensionale medio iniziale agente sul palo modello.

La pressione iniziale media  $p'_0$ , agente sul fusto del palo è stata calcolata come:

$$p'_0 = (\sigma'_{v0} + 2\sigma'_{n0})/3 \quad [FL^{-2}] \quad (4.11)$$

L'indice dei vuoti iniziale medio  $e_0$  è stimato a fine consolidazione, utilizzando la relazione:

$$e_0 = (G_s/\gamma_d) - 1 \quad [-] \quad (4.12)$$

Con:

$\gamma_d$  = peso per unità di volume del terreno secco

Il valore dello spostamento radiale  $\Delta y$ , ovvero dell'espansione che la banda di taglio subisce a seguito dell'applicazione del carico assiale alla testa del palo, è di difficile determinazione. I dati reperiti in letteratura appaiono infatti discordanti.

Esso sembra essere funzione principalmente delle caratteristiche geometriche dei grani di sabbia e della rugosità superficiale dell'interfaccia e non dipendente dal diametro del palo [Boulon e Nova 1990]. Jardine et al. [1993] ritengono che esso possa essere funzione anche della  $D_R$  e dello stato tensionale all'interfaccia.

Chow [1997] e Jardine et al. [2005] hanno quantificato  $\Delta y$  rapportandolo alla misura di  $R_a$ , rugosità media della superficie del palo:

$$\Delta y \approx 2R_a \quad [L] \quad (4.13)$$

Per i pali modello rugosi utilizzati nella sperimentazione in centrifuga, caratterizzati dalla periodicità del profilo di rugosità, si può assumere:

$$R_a \approx R_t/2 \quad [L] \quad (4.14)$$

Ricordando che  $R_t$  è compresa tra 0.08 mm e 0.13 mm (Tab. 1.5) si può fissare un valore medio di  $R_a$  di circa 0.05 mm. Di conseguenza  $\Delta y$  da (4.13) è comparabile al  $D_{50}$  della sabbia FF impiegata nella sperimentazione.

Schneider [2007], interpretando i risultati sperimentali di un'ampia banca dati di prove di taglio di interfaccia su piastre rugose a contatto con campioni di sabbia densa di differenti natura e granulometria, propone una correlazione per determinare  $\Delta y$  funzione sia della  $R_a$  della piastra che del  $D_{50}$  della sabbia testata:

$$\Delta y \approx 2.5 D_{50}^{0.4} R_a^{0.6} \quad [L] \quad (4.15)$$

Applicando la (4.15) all'interpretazione delle prove di carico sui pali in centrifuga, il valore di  $\Delta y$  ricavato è pari a circa il doppio del  $D_{50}$  della sabbia FF.

Dall'interpretazione di prove DS-CNS su campioni di sabbia UWA ( $D_{50}=0.22$  mm) densa ( $D_R=85\%$ ), Lehane et al. [2005] propongono una stima di  $\Delta y$  minore rispetto alle precedenti:

$$\Delta y \approx 0.7 D_{50} \quad [L] \quad (4.16)$$

Le stime di  $\Delta y$  ricavate dalle correlazioni di letteratura, appaiono concordi con i risultati delle prove DS-CNS eseguite con sabbia FF a contatto piastra con  $R_n > R_{n|cr}$  (Cap. 3): il valore di  $u$  (variazione di altezza del provino di taglio), assunto come rappresentativo della deformazione della banda di taglio, è prossimo a  $D_{50}$  della sabbia FF impiegata nella



sperimentazione. A MD i valori di  $u$  registrati oscillano attorno a 0, con valori dilatanti e contraenti di  $\pm D_{50}/2$ , con picchi attorno a  $D_{50}$ ; a HD le variazioni di altezza del campione sono dell'ordine di  $D_{50}$ .

Nelle Tabelle 4.1 sono riassunti i valori di  $G_0$ ,  $G$  e  $\Delta\sigma'_n$  calcolati per le prove in centrifuga con carico assiale di trazione, in Tabella 4.1a, e di compressione, in Tabella 4.1b, rispettivamente. I valori di  $\Delta\sigma'_n$  sono calcolati per  $\Delta y = D_{50}$ , dalla (4.13).

Inoltre, in accordo con le evidenze sperimentali di DeJong e Westgate [2008], basate su misure locali dello spostamento normale all'interfaccia, si assume, in mancanza di altri riferimenti, che  $\Delta y$  sia lo stesso per media e alta densità.

In Figura 4.5 i rapporti  $\Delta\sigma'_n/\sigma'_{n0}$  sono diagrammati in funzione della pressione di confinamento  $\sigma'_{n0}$  iniziale, distinguendo tra prove a MD ed a HD.

La curva interpolatrice dei dati a MD e HD, mostrata con tratto continuo in Figura 4.5, è unica e ha equazione:

$$\Delta\sigma'_n/\sigma'_{n0} = 0.08(\sigma'_{n0}/p_a)^{-1.5} \quad [-] \quad (4.17)$$

Con:

$p_a = 101 \text{ kPa}$ , pressione atmosferica

I rapporti  $\Delta\sigma'_n/\sigma'_{n0}$  calcolati appaiono simili tra loro al variare della densità relativa, nonostante il comportamento all'interfaccia sia differente, come documentato in letteratura principalmente da prove DS-CNL e DS-CNS (Cap. 3).

L'andamento decrescente è concorde a quanto osservato dai risultati della campagna di prove di taglio a rigidità normale imposta condotta su sabbia FF (Cap. 3). Conferme su tale andamento sono rintracciabili anche in Lehane et al. [1993], Balachowski [1995] e Lehane et al. [2005].

| Prove di carico in trazione |               |              |              |                         |              |                |               |                            |
|-----------------------------|---------------|--------------|--------------|-------------------------|--------------|----------------|---------------|----------------------------|
| Nome prova                  | Modello       |              |              |                         |              |                | Val. al picco |                            |
|                             | $d_m$<br>[mm] | $D_R$<br>[%] | $a/g$<br>[-] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $e_0$<br>[-] | $G_0$<br>[MPa] | $G$<br>[MPa]  | $\Delta\sigma'_n$<br>[kPa] |
| SPT_8_MD_30                 | 8             | 55.1         | 30           | 12.8                    | 0.800        | 34.0           | 13.6          | 19.7                       |
| SPT_8_MD_60                 | 8             | 55.3         | 60           | 28.5                    | 0.803        | 50.5           | 20.2          | 14.7                       |
| SPT_8_MD_120                | 8             | 57.5         | 120          | 57.2                    | 0.803        | 71.5           | 28.6          | 10.4                       |
| SPT_8_MD_160                | 8             | 57.2         | 160          | 67.6                    | 0.803        | 77.7           | 31.1          | 8.6                        |
| SPT_8_HD_30                 | 8             | 82.6         | 30           | 14.0                    | 0.815        | 34.7           | 13.9          | 20.1                       |
| SPT_8_HD_60                 | 8             | 83.0         | 60           | 33.7                    | 0.815        | 53.8           | 21.5          | 15.6                       |
| SPT_8_HD_120                | 8             | 84.3         | 120          | 57.8                    | 0.816        | 70.4           | 28.2          | 10.2                       |
| SPT_8_HD_160                | 8             | 86.7         | 160          | 73.6                    | 0.817        | 79.3           | 31.7          | 8.8                        |
| PT1_FF32                    | 10            | 43.3         | 30           | 22.5                    | 0.799        | 45.1           | 18.0          | 20.6                       |
| PT1_FF38                    | 10            | 50.5         | 80           | 59.2                    | 0.799        | 73.2           | 29.3          | 12.6                       |
| PT1_FF31                    | 10            | 55.0         | 130          | 99.1                    | 0.805        | 93.8           | 37.5          | 10.0                       |
| PT1_FF45                    | 10            | 43.3         | 30           | 22.4                    | 0.799        | 45.0           | 18.0          | 20.8                       |
| PT1_FF44                    | 10            | 46.3         | 80           | 59.4                    | 0.801        | 73.1           | 29.2          | 12.7                       |
| PT1_FF43                    | 10            | 44.8         | 130          | 95.6                    | 0.800        | 92.9           | 37.2          | 9.9                        |
| PT1_FF29                    | 10            | 76.4         | 30           | 24.6                    | 0.816        | 45.9           | 18.4          | 21.0                       |
| PT1_FF33                    | 10            | 83.0         | 80           | 64.5                    | 0.815        | 73.3           | 29.3          | 12.7                       |
| PT1_FF30                    | 10            | 85.9         | 130          | 104.9                   | 0.816        | 94.8           | 37.9          | 10.1                       |
| PT1_FF47                    | 10            | 76.1         | 30           | 24.3                    | 0.816        | 45.7           | 18.3          | 21.1                       |
| PT1_FF42                    | 10            | 75.9         | 80           | 64.5                    | 0.816        | 74.4           | 29.8          | 12.9                       |
| PT1_FF46                    | 10            | 75.1         | 130          | 105.8                   | 0.815        | 95.4           | 38.1          | 10.2                       |
| SPT_16_MD_30                | 16            | 54.7         | 30           | 29.2                    | 0.801        | 51.2           | 20.5          | 14.4                       |
| SPT_16_MD_80                | 16            | 58.5         | 80           | 81.4                    | 0.803        | 85.3           | 34.1          | 8.8                        |
| SPT_16_HD_30                | 16            | 81.5         | 30           | 31.8                    | 0.814        | 52.3           | 20.9          | 14.8                       |
| SPT_16_HD_80                | 16            | 83.5         | 80           | 87.3                    | 0.815        | 86.6           | 34.6          | 8.9                        |
| PULL 1                      | 32            | 44.4         | 30           | 29.3                    | 0.796        | 51.7           | 20.7          | 7.3                        |
| PULL 2                      | 32            | 45.5         | 80           | 77.3                    | 0.797        | 83.9           | 33.6          | 4.4                        |
| PULL 3                      | 32            | 50.0         | 130          | 127.5                   | 0.799        | 107.4          | 43.0          | 3.5                        |
| PULL 8                      | 32            | 45.9         | 30           | 29.1                    | 0.797        | 51.5           | 20.6          | 7.3                        |
| PULL 9                      | 32            | 51.3         | 80           | 78.1                    | 0.800        | 84.0           | 33.6          | 4.4                        |
| PULL 4                      | 32            | 81.4         | 130          | 138.3                   | 0.814        | 109.2          | 43.7          | 3.6                        |
| PULL 5                      | 32            | 84.3         | 80           | 86.5                    | 0.816        | 86.1           | 34.5          | 4.6                        |
| PULL 6                      | 32            | 83.9         | 30           | 32.0                    | 0.816        | 52.4           | 21.0          | 7.4                        |
| PULL 7                      | 32            | 84.5         | 30           | 32.3                    | 0.816        | 52.6           | 21.1          | 7.4                        |
| PULL 10                     | 32            | 84.0         | 80           | 85.7                    | 0.816        | 85.8           | 34.3          | 4.5                        |
| PULL 11                     | 32            | 85.0         | 130          | 139.3                   | 0.816        | 109.2          | 43.7          | 3.6                        |
| PULL 12                     | 32            | 84.6         | 30           | 32.5                    | 0.816        | 52.8           | 21.1          | 7.4                        |

*-Tabella 4.1a – Quadro riassuntivo dei valori di  $\Delta\sigma'_n$  da teoria della cavità espansa per le prove di trazione.*

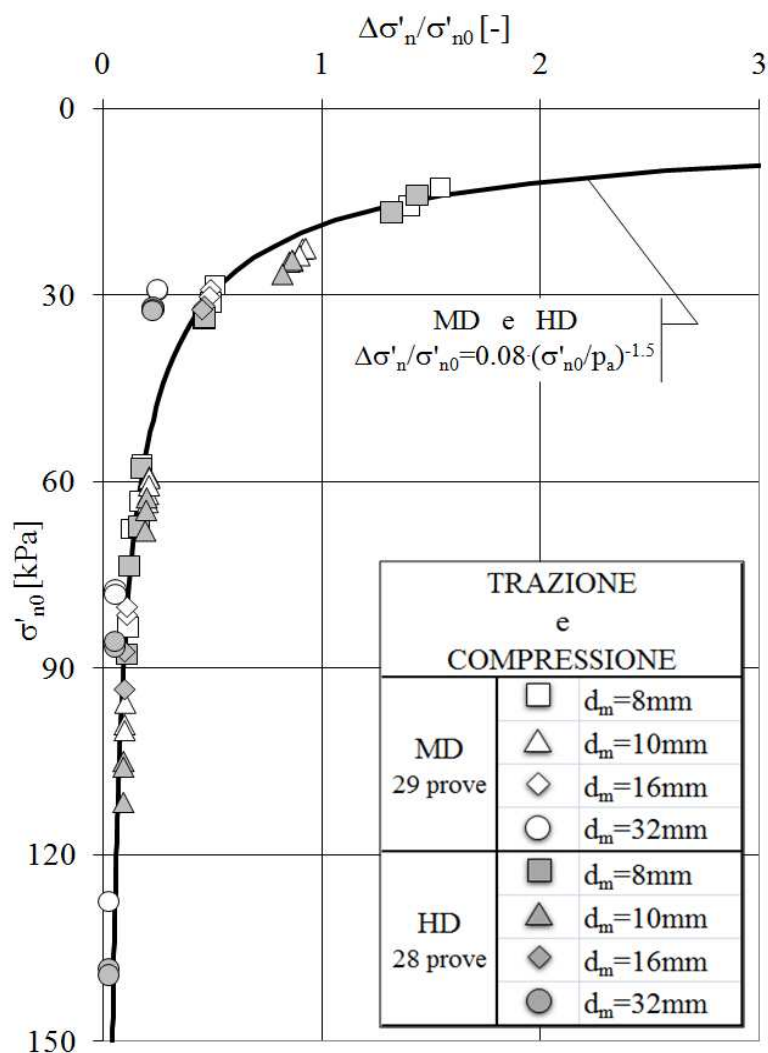
| Prove di carico in compressione |               |              |              |                         |              |                |                 |                            |
|---------------------------------|---------------|--------------|--------------|-------------------------|--------------|----------------|-----------------|----------------------------|
| Nome prova                      | Modello       |              |              |                         |              |                | Valori al picco |                            |
|                                 | $d_m$<br>[mm] | $D_R$<br>[%] | $a/g$<br>[-] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $e_0$<br>[-] | $G_0$<br>[MPa] | $G$<br>[MPa]    | $\Delta\sigma'_n$<br>[kPa] |
| SPC_8_MD_30                     | 8             | 50.3         | 30           | 15.6                    | 0.799        | 37.6           | 15.0            | 21.8                       |
| SPC_8_MD_60                     | 8             | 52.7         | 60           | 31.2                    | 0.800        | 53.0           | 21.2            | 15.4                       |
| SPC_8_MD_120                    | 8             | 55.2         | 120          | 63.1                    | 0.802        | 75.3           | 30.1            | 10.9                       |
| SPC_8_MD_160                    | 8             | 57.9         | 160          | 83.4                    | 0.803        | 86.3           | 34.5            | 9.6                        |
| SPC_8_HD_30                     | 8             | 81.5         | 30           | 16.7                    | 0.814        | 37.9           | 15.2            | 22.0                       |
| SPC_8_HD_60                     | 8             | 82.5         | 60           | 33.6                    | 0.815        | 53.8           | 21.5            | 15.6                       |
| SPC_8_HD_120                    | 8             | 82.8         | 120          | 67.2                    | 0.815        | 76.0           | 30.4            | 11.1                       |
| SPC_8_HD_160                    | 8             | 83.2         | 160          | 87.8                    | 0.815        | 86.9           | 34.7            | 9.7                        |
| PT3a_FF1                        | 10            | 56.2         | 30           | 24.5                    | 0.802        | 46.9           | 18.7            | 21.3                       |
| PT3a_FF7                        | 10            | 43.5         | 30           | 23.6                    | 0.796        | 46.5           | 18.6            | 21.3                       |
| PT3a_FF8                        | 10            | 45.9         | 80           | 62.0                    | 0.797        | 75.2           | 30.1            | 13.0                       |
| PT3a_FF2                        | 10            | 41.7         | 80           | 60.6                    | 0.795        | 74.6           | 29.8            | 12.9                       |
| PT1_FF28                        | 10            | 50.9         | 80           | 63.3                    | 0.800        | 75.6           | 30.3            | 13.1                       |
| PT3a_FF6                        | 10            | 45.8         | 130          | 100.0                   | 0.797        | 95.5           | 38.2            | 10.2                       |
| PT3a_FF9                        | 10            | 85.1         | 30           | 26.7                    | 0.816        | 47.8           | 19.1            | 21.9                       |
| PT3a_FF3                        | 10            | 82.3         | 80           | 67.9                    | 0.815        | 76.4           | 30.6            | 13.2                       |
| PT3a_FF5                        | 10            | 83.7         | 130          | 111.5                   | 0.815        | 97.8           | 39.1            | 10.6                       |
| SPC_16_MD_30                    | 16            | 51.9         | 30           | 30.2                    | 0.800        | 52.2           | 20.9            | 14.8                       |
| SPC_16_MD_80                    | 16            | 57.4         | 80           | 80.1                    | 0.803        | 84.7           | 33.9            | 8.7                        |
| SPC_16_HD_30                    | 16            | 80.3         | 30           | 32.3                    | 0.814        | 52.8           | 21.1            | 14.7                       |
| SPC_16_HD_80                    | 16            | 83.2         | 80           | 93.3                    | 0.815        | 89.5           | 35.8            | 9.2                        |

*-Tabella 4.1b– Quadro riassuntivo dei valori di  $\Delta\sigma'_n$  da teoria della cavità espansa per le prove di compressione.*

Noti gli incrementi tensionali  $\Delta\sigma'_n$ , si applica la (4.8) per calcolare la tensione tangenziale di picco  $\tau_{su}$ , relativa ad ogni palo testato in centrifuga. Il confronto tra il valore di  $\tau_{su}$  ricavato dall'interpretazione delle prove di carico sui pali modello (Cap. 2), nel seguito indicato come  $\tau_{su|mis}$ , con il valore calcolato dalla (4.8),  $\tau_{su|calc}$ , fornisce una stima della correttezza dei  $\Delta\sigma'_n$  ricavati dalla teoria della cavità espansa per i pali trivellati.

Nell'applicazione della (4.8) la tensione normale al fusto del palo a fine installazione è assunta pari a  $\sigma'_{n0}$ , tensione normale alla fine della consolidazione, giustificata dal fatto che i pali sono idealmente trivellati.

Inoltre, per le osservazioni sulla rugosità normalizzata dei fusti dei pali modello trivellati, già discusse al Capitolo 2 e 3, l'angolo di attrito all'interfaccia può essere considerato pari al suo limite superiore  $\phi'_{cv}$ : per il tipo di deformazione assialsimmetrica che si genera attorno al palo caricato, è assunto per la sabbia FF  $\phi'_{cv}=33^\circ$ .



-Figura 4.5 – Andamento del rapporto  $\Delta\sigma'_n/\sigma'_{n0}$  rispetto a  $\sigma'_{n0}$  per prove di trazione e compressione su pali rugosi trivellati in centrifuga: MD e HD.

In Tabella 4.2 sono riassunti i valori di  $\tau_{su}$ , ottenuti per ciascuna prova di trazione (Tab. 4.2a) e di compressione (Tab. 4.2b), ricavati dall'elaborazione dei dati (Cap. 2) e calcolati dalla formula (4.8). Il valore di  $\Delta\sigma'_n$  è stimato utilizzando l'equazione interpolatrice (4.17).

I valori di  $\tau_{su|calc}$  sono poi rappresentati graficamente in Figura 4.6, rispetto a  $\tau_{su|mis}$ , distinguendoli in funzione della densità relativa; è inoltre indicata una banda di errore di  $\pm 20\%$ .

Dal risultato mostrato in Figura 4.6 è possibile osservare che la stima di  $\tau_{su}$ , ottenuta per le prove a MD appare buona, in quanto i dati si dispongono attorno alla linea di ottimo. Al contrario, l'approccio utilizzato sottostima sistematicamente le tensioni tangenziali di picco delle prove a HD, con un errore superiore al 20%.

Ipotizzando di assumere  $\Delta y = 2D_{50}$ , in accordo con la (4.15) per entrambe le densità relative, il confronto, tra i valori di  $\tau_{su}$  misurati e quelli calcolati non migliora, come mostrato in Figura 4.7: le tensioni tangenziali di picco risultano ancora sottostimate per i modelli a HD.

In conclusione, l'approccio della cavità espansa, usato come descritto per interpretare le prove di carico dei pali trivellati in sabbia, sottostima i valori di  $\Delta\sigma'_n$  delle prove ad alta densità pur riproducendo con buona approssimazione quelli relativi alle prove a media densità per le quali i valori di  $\Delta\sigma'_n$  sono comunque modesti.

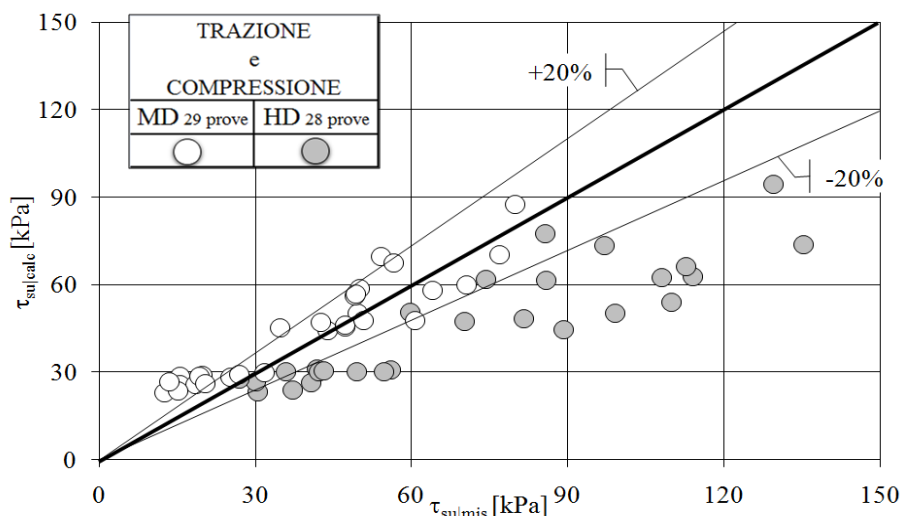
L'unicità della curva interpolatrice dei rapporti  $\Delta\sigma'_n/\sigma'_{n0}$ , mostrata in Figura 4.5, dipende dalla limitata variabilità del modulo di taglio tangente  $G_0$  dall'indice dei vuoti e quindi dalla densità relativa del modello.

| Prove di carico in trazione |               |              |              |                         |                          |                           |
|-----------------------------|---------------|--------------|--------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Nome prova                  | Modello       |              |              |                         | Valori al picco          |                           |
|                             | $d_m$<br>[mm] | $D_R$<br>[%] | $a/g$<br>[-] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{su/mis}$<br>[kPa] | $\tau_{su/calc}$<br>[kPa] |
| SPT_8_MD_30                 | 8             | 55.1         | 30           | 12.8                    | 12.6                     | 23.1                      |
| SPT_8_MD_60                 | 8             | 55.3         | 60           | 28.5                    | 25.3                     | 28.4                      |
| SPT_8_MD_120                | 8             | 57.5         | 120          | 57.2                    | 49.5                     | 44.1                      |
| SPT_8_MD_160                | 8             | 57.2         | 160          | 67.6                    | 49.6                     | 50.3                      |
| SPT_8_HD_30                 | 8             | 82.6         | 30           | 14.0                    | 30.5                     | 23.2                      |
| SPT_8_HD_60                 | 8             | 83.0         | 60           | 33.7                    | 41.9                     | 31.0                      |
| SPT_8_HD_120                | 8             | 84.3         | 120          | 57.8                    | 93.2                     | 44.5                      |
| SPT_8_HD_160                | 8             | 86.7         | 160          | 73.6                    | 110                      | 53.9                      |
| PT1_FF32                    | 10            | 43.3         | 30           | 22.5                    | 15.5                     | 25.7                      |
| PT1_FF38                    | 10            | 50.5         | 80           | 59.2                    | 34.7                     | 45.3                      |
| PT1_FF31                    | 10            | 55.0         | 130          | 99.1                    | 54.2                     | 69.7                      |
| PT1_FF45                    | 10            | 43.3         | 30           | 22.4                    | 18.5                     | 25.7                      |
| PT1_FF44                    | 10            | 46.3         | 80           | 59.4                    | 47.3                     | 45.4                      |
| PT1_FF43                    | 10            | 44.8         | 130          | 95.6                    | 56.6                     | 67.5                      |
| PT1_FF29                    | 10            | 76.4         | 30           | 24.6                    | 30.0                     | 26.6                      |
| PT1_FF33                    | 10            | 83.0         | 80           | 32.6                    | 70.1                     | 47.3                      |
| PT1_FF30                    | 10            | 85.9         | 130          | 53.0                    | 97.0                     | 73.3                      |
| PT1_FF47                    | 10            | 76.1         | 30           | 24.3                    | 40.8                     | 26.5                      |
| PT1_FF42                    | 10            | 75.9         | 80           | 64.5                    | 81.5                     | 48.5                      |
| PT1_FF46                    | 10            | 75.1         | 130          | 105.8                   | 135.3                    | 73.8                      |
| SPT_16_MD_30                | 16            | 54.7         | 30           | 29.2                    | 15.4                     | 28.7                      |
| SPT_16_MD_80                | 16            | 58.5         | 80           | 81.4                    | 50.1                     | 58.7                      |
| SPT_16_HD_30                | 16            | 81.5         | 30           | 31.8                    | 49.5                     | 30.0                      |
| SPT_16_HD_80                | 16            | 83.5         | 80           | 87.3                    | 108                      | 62.3                      |
| PULL 1                      | 32            | 44.4         | 30           | 29.3                    | 19.9                     | 28.8                      |
| PULL 2                      | 32            | 45.5         | 80           | 77.3                    | 49.1                     | 56.2                      |
| PULL 3                      | 32            | 50.0         | 130          | 127.5                   | 79.9                     | 87.5                      |
| PULL 8                      | 32            | 45.9         | 30           | 29.1                    | 19.3                     | 28.7                      |
| PULL 9                      | 32            | 51.3         | 80           | 78.1                    | 49.2                     | 56.7                      |
| PULL 4                      | 32            | 81.4         | 130          | 138.3                   | 129                      | 94.3                      |
| PULL 5                      | 32            | 84.3         | 80           | 86.5                    | 74.3                     | 61.8                      |
| PULL 6                      | 32            | 83.9         | 30           | 32                      | 35.9                     | 30.1                      |
| PULL 7                      | 32            | 84.5         | 30           | 32.3                    | 42.2                     | 30.3                      |
| PULL 10                     | 32            | 84.0         | 80           | 85.7                    | 85.9                     | 61.4                      |
| PULL 11                     | 32            | 85.0         | 130          | 139.3                   | 141                      | 94.9                      |
| PULL 12                     | 32            | 84.6         | 30           | 32.5                    | 43.2                     | 30.4                      |

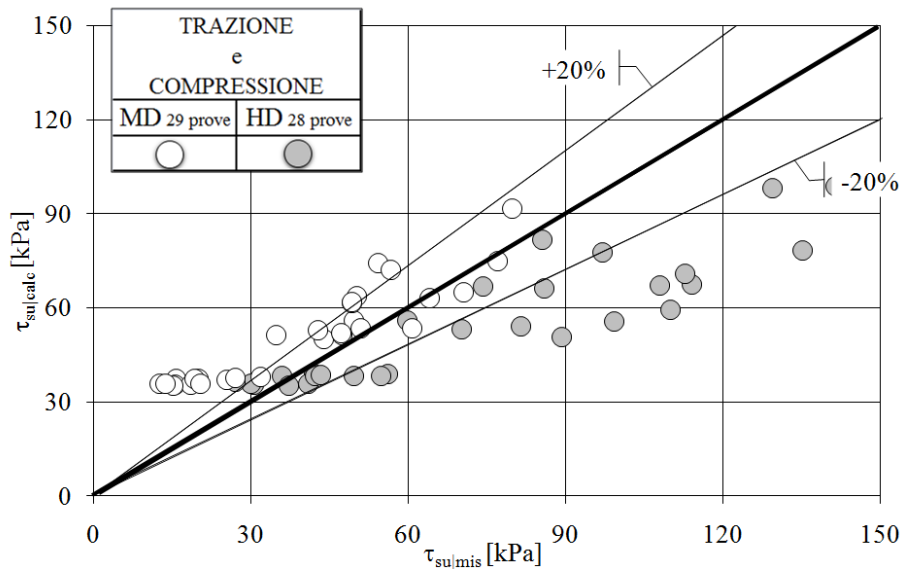
*-Tabella 4.2a – Quadro riassuntivo dei valori di  $\tau_{su/mis}$  e  $\tau_{su/calc}$  per le prove di trazione, con  $\Delta\sigma'_n$  da teoria della cavità espansa.*

| Prove di carico in compressione |               |              |              |                         |                          |                           |
|---------------------------------|---------------|--------------|--------------|-------------------------|--------------------------|---------------------------|
| Nome prova                      | Modello       |              |              |                         | Valori al picco          |                           |
|                                 | $d_m$<br>[mm] | $D_R$<br>[%] | $a/g$<br>[-] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{su/mis}$<br>[kPa] | $\tau_{su/calc}$<br>[kPa] |
| SPC_8_MD_30                     | 8             | 50.3         | 30           | 15.6                    | 15.2                     | 23.5                      |
| SPC_8_MD_60                     | 8             | 52.7         | 60           | 31.2                    | 31.8                     | 29.7                      |
| SPC_8_MD_120                    | 8             | 55.2         | 120          | 63.1                    | 60.7                     | 47.6                      |
| SPC_8_MD_160                    | 8             | 57.9         | 160          | 83.4                    | 70.5                     | 59.9                      |
| SPC_8_HD_30                     | 8             | 81.5         | 30           | 16.7                    | 37.2                     | 23.7                      |
| SPC_8_HD_60                     | 8             | 82.5         | 60           | 33.6                    | 56.0                     | 30.9                      |
| SPC_8_HD_120                    | 8             | 82.8         | 120          | 67.2                    | 99.2                     | 50.1                      |
| SPC_8_HD_160                    | 8             | 83.2         | 160          | 87.8                    | 114.0                    | 62.6                      |
| PT3a_FF1                        | 10            | 56.2         | 30           | 24.5                    | 13.6                     | 26.6                      |
| PT3a_FF7                        | 10            | 43.5         | 30           | 23.6                    | 20.4                     | 26.2                      |
| PT3a_FF8                        | 10            | 45.9         | 80           | 62.0                    | 42.7                     | 47.0                      |
| PT3a_FF2                        | 10            | 41.7         | 80           | 60.6                    | 47.2                     | 46.1                      |
| PT1_FF28                        | 10            | 50.9         | 80           | 63.3                    | 50.8                     | 47.7                      |
| PT3a_FF6                        | 10            | 45.8         | 130          | 100.0                   | 77.0                     | 70.2                      |
| PT3a_FF9                        | 10            | 85.1         | 30           | 26.7                    | 27.0                     | 27.5                      |
| PT3a_FF3                        | 10            | 82.3         | 80           | 67.9                    | 59.7                     | 50.5                      |
| PT3a_FF5                        | 10            | 83.7         | 130          | 111.5                   | 85.6                     | 77.4                      |
| SPC_16_MD_30                    | 16            | 51.9         | 30           | 30.2                    | 27.0                     | 29.2                      |
| SPC_16_MD_80                    | 16            | 57.4         | 80           | 80.1                    | 64.0                     | 57.9                      |
| SPC_16_HD_30                    | 16            | 80.3         | 30           | 32.3                    | 54.7                     | 30.3                      |
| SPC_16_HD_80                    | 16            | 83.2         | 80           | 93.3                    | 112.7                    | 66.0                      |

-Tabella 4.2b – Quadro riassuntivo dei valori di  $\tau_{su/mis}$  e  $\tau_{su/calc}$  per le prove di compressione, con  $\Delta\sigma'_n$  da teoria della cavità espansa.



-Figura 4.6 – Confronto tra  $\tau_{su/calc}$  e  $\tau_{su/mis}$  per prove in trazione e compressione eseguite su pali modello trivellati in sabbia FF testati in centrifuga: MD e HD e  $\Delta\gamma=D_{50}$ .



-Figura 4.7 – Confronto tra  $\tau_{su|calc}$  e  $\tau_{su|mis}$  per prove in trazione e compressione eseguite su pali modello trivellati in sabbia FF testati in centrifuga: MD e HD e  $\Delta y = 2D_{50}$ .

#### 4.3 DETERMINAZIONE DI $\Delta\sigma'_n$ DA PROVE IN CENTRIFUGA

Di seguito è illustrata una procedura empirica per determinare  $\Delta\sigma'_n$  direttamente dalle prove in centrifuga basata su tre principali ipotesi di lavoro.

##### Ipotesi 1

Prove condotte su modelli di sabbia FF ricostruiti a MD:

la tensione tangenziale a volume costante  $\tau_{cv|MD}$  è mobilitata per una tensione normale pari a quella iniziale  $\sigma'_{n0}$ :

$$\Delta\sigma'_n \approx 0 \text{ kPa per } \tau = \tau_{cv|MD}$$

##### Ipotesi 2

Prove condotte su modelli di sabbia FF ricostruiti a MD:

il valore della tensione tangenziale di picco  $\tau_{su|MD}$  è interamente imputabile allo sviluppo di una  $\Delta\sigma'_n$  rispetto a  $\sigma'_{n0}$ :

$$\phi'_p = \phi'_{cv} \text{ per } \tau = \tau_{su|MD}$$

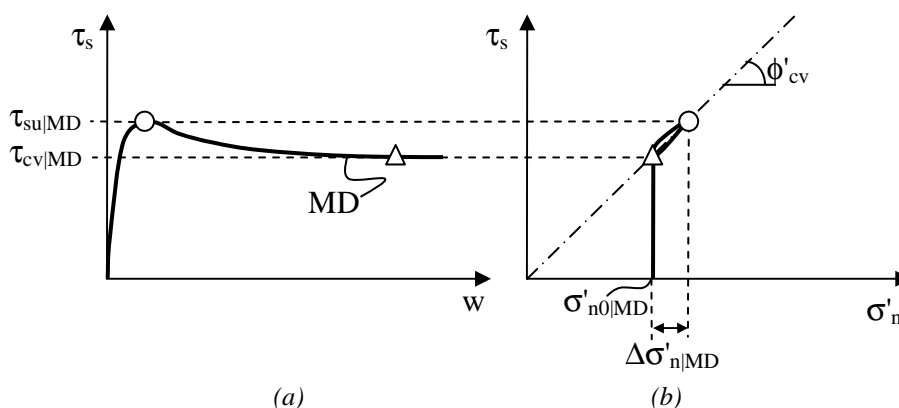
con  $\phi'_p$  = angolo di resistenza al taglio di picco

Le ipotesi di lavoro 1 e 2 possono essere chiarite osservando i percorsi di carico schematizzati in Figura 4.8.



In Figura 4.8a le  $\tau_s$ , riferite al modello a MD, crescono al progredire del cedimento  $w$  arrivando ad un valore di picco  $\tau_{su|MD}$  superato il quale la curva diviene rammollente fino a raggiungere la  $\tau_{cv|MD}$  a volume costante

A tale andamento, nel piano  $\sigma'_n$ - $\tau_s$  (Fig. 4.8b) corrisponde un incremento delle tensioni tangenziali fino alla linea di rottura avente pendenza  $\phi'_{cv}$ , raggiunta assumendo che  $\sigma'_n$  si mantenga costante e pari a  $\sigma'_{n0|MD}$ . Successivamente, le  $\tau_s$  continuano ad aumentare fino al valore di picco  $\tau_{su|MD}$  che si trova sulla linea di rottura con pendenza  $\phi'_{cv}$ , in accordo con l'ipotesi 2. L'attrito massimo si mobilita per una tensione media normale di  $\sigma'_{n0|MD} + \Delta\sigma'_{n|MD}$ , per poi decrescere, lungo la linea di stato critico, fino al valore  $\tau_{cv|MD}$  sviluppato per  $\sigma'_n \approx \sigma'_{n0|MD}$ , in accordo con l'ipotesi 1.



-Figura 4.8– Percorso tensionale semplificato per una prova in centrifuga su palo rugoso trivellato in sabbia a MD: (a) curva  $\tau_s$ - $w$ ; (b) curva  $\tau_s$ - $\sigma'_n$ .

### Ipotesi 3

Prove condotte su modelli di sabbia FF ricostruiti a HD:

assunta l'ipotesi 1 e in analogia con l'ipotesi 2, la tensione tangenziale massima  $\tau_{su|HD}$  è mobilitata a fronte di un incremento  $\Delta\sigma'_{n|HD}$  rispetto al valore iniziale  $\sigma'_{n0|HD}$ :

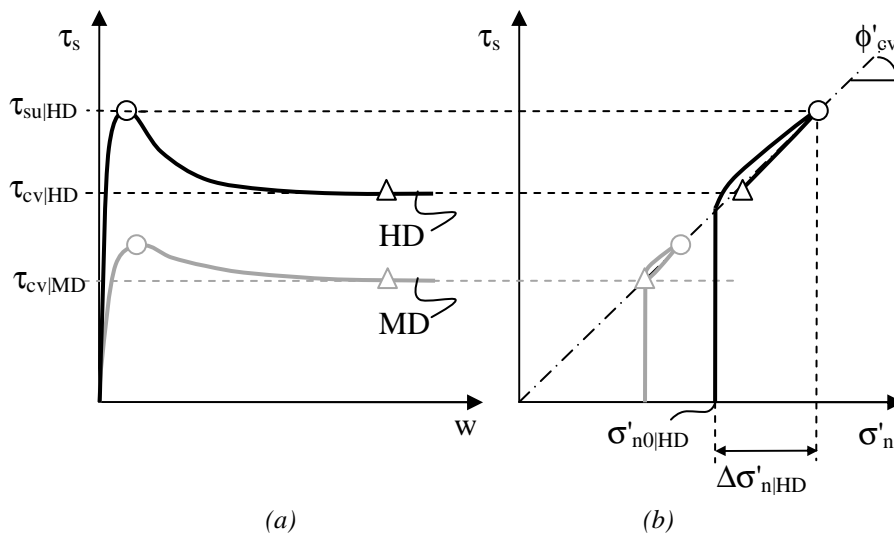
$$\phi'_p = \phi'_{cv} \text{ per } \tau = \tau_{su|HD}$$

La terza ipotesi di lavoro può essere chiarita osservando i percorsi tensionali schematizzati in Figura 4.9, in cui le curve relative alla prova a MD sono tracciate per riferimento e confronto.

Per i modelli a HD, l'andamento  $\tau_s$ - $w$  è di tipo rammollente con un valore di picco  $\tau_{su|HD}$  superato il quale l'attrito si riduce fino a raggiungere la tensione a volume costante  $\tau_{cv|HD}$  (Fig. 4.9a).

A tale andamento nel piano  $\sigma'_n$ - $\tau_s$  (Fig. 4.9b) corrisponde un incremento delle tensioni tangenziali fino alla linea di rottura avente pendenza  $\phi'_{cv}$  raggiunta assumendo  $\sigma'_n$  costante e pari a  $\sigma'_{n0|HD}$ . Successivamente, le  $\tau_s$  continuano ad aumentare fino al valore di picco  $\tau_{su|HD}$  mobilitato in corrispondenza della linea di rottura di pendenza  $\phi'_{cv}$ , in accordo con l'ipotesi 3, a fronte di una tensione normale corrispondente pari a  $\sigma'_{n0|HD} + \Delta\sigma'_{n|HD}$ .

Oltre il valore di picco, le tensioni taglianti decrescono, seguendo la linea di stato critico, fino al valore  $\tau_{cv|HD}$  mobilitato per  $\sigma'_n > \sigma'_{n0|HD}$ : in accordo alle evidenze sperimentali in centrifuga,  $\tau_{cv|HD} > \tau_{cv|MD}$  ad indicare che a parità di  $\phi'_{cv}$  del materiale utilizzato in entrambe le prove, il valore di  $\Delta\sigma'_{n|HD} > 0$  a volume costante.



-Figura 4.9 – Percorso tensionale semplificato per una prova in centrifuga su palo rugoso trivellato in sabbia a HD: (a) curva  $\tau_s$ - $w$ ; (b) curva  $\tau_s$ - $\sigma'_n$ .

Dalla Figura 4.8b è possibile stimare il contributo  $\Delta\sigma'_{n|MD}$  che ha portato alla mobilitazione di  $\tau_{su|MD}$ :

$$\Delta\sigma'_{n|MD} = \frac{\tau_{su|MD} - \tau_{cv|MD}}{\tan \phi'_{cv}} \quad [FL^{-2}] \quad (4.18)$$

Analogamente, dalla Figura 4.9b è possibile quantificare l'entità di  $\Delta\sigma'_{n|HD}$  che ha portato alla mobilitazione di  $\tau_{su|HD}$ , ricordando che  $\tau_{cv|MD}$  rappresenta la tensione tangenziale raggiungibile per  $\Delta\sigma'_n = 0$ :

$$\Delta\sigma'_{n|HD} = \frac{\tau_{su|HD} - \tau_{cv|MD}}{\tan \varphi'_{cv}} - (\sigma'_{n0|HD} - \sigma'_{n0|MD}) \quad [FL^{-2}] \quad (4.19)$$

| Prove di carico in trazione |                        |                       |            |                           |                          |                             |                           |
|-----------------------------|------------------------|-----------------------|------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| Nome prova                  | Modello                |                       |            |                           | Valori al picco          |                             |                           |
|                             | d <sub>m</sub><br>[mm] | D <sub>R</sub><br>[%] | a/g<br>[-] | σ' <sub>n0</sub><br>[kPa] | τ <sub>su</sub><br>[kPa] | τ <sub>cv MD</sub><br>[kPa] | Δσ' <sub>n</sub><br>[kPa] |
| SPT_8_MD_30                 | 8                      | 55.1                  | 30         | 12.8                      | 12.6                     | 7.6                         | 7.7                       |
| SPT_8_MD_60                 | 8                      | 55.3                  | 60         | 28.5                      | 25.3                     | 16.9                        | 12.9                      |
| SPT_8_MD_120                | 8                      | 57.5                  | 120        | 57.2                      | 49.5                     | 27.0                        | 25.9                      |
| SPT_8_MD_160                | 8                      | 57.2                  | 160        | 67.6                      | 49.6                     | 38.5                        | 17.1                      |
| SPT_8_HD_30                 | 8                      | 82.6                  | 30         | 14.0                      | 30.5                     | 7.6                         | 34.0                      |
| SPT_8_HD_60                 | 8                      | 83.0                  | 60         | 33.7                      | 41.9                     | 16.9                        | 33.3                      |
| SPT_8_HD_120                | 8                      | 84.3                  | 120        | 57.8                      | 93.2                     | 27.0                        | 95.2                      |
| SPT_8_HD_160                | 8                      | 86.7                  | 160        | 73.6                      | 110                      | 38.5                        | 104.1                     |
| PT1_FF32                    | 10                     | 43.3                  | 30         | 22.5                      | 15.5                     | 12.9                        | 4.0                       |
| PT1_FF38                    | 10                     | 50.5                  | 80         | 59.2                      | 34.7                     | 28.6                        | 9.4                       |
| PT1_FF31                    | 10                     | 55.0                  | 130        | 99.1                      | 54.2                     | 47.1                        | 10.9                      |
| PT1_FF45                    | 10                     | 43.3                  | 30         | 22.4                      | 18.5                     | 15.0                        | 5.4                       |
| PT1_FF44                    | 10                     | 46.3                  | 80         | 59.4                      | 47.3                     | 34.1                        | 20.3                      |
| PT1_FF43                    | 10                     | 44.8                  | 130        | 95.6                      | 56.6                     | 50.0                        | 10.2                      |
| PT1_FF29                    | 10                     | 76.4                  | 30         | 24.6                      | 30.0                     | 12.9                        | 24.2                      |
| PT1_FF33                    | 10                     | 83.0                  | 80         | 32.6                      | 70.1                     | 28.6                        | 60.6                      |
| PT1_FF30                    | 10                     | 85.9                  | 130        | 53.0                      | 97.0                     | 47.1                        | 71.0                      |
| PT1_FF47                    | 10                     | 76.1                  | 30         | 24.3                      | 40.8                     | 15.0                        | 37.8                      |
| PT1_FF42                    | 10                     | 75.9                  | 80         | 64.5                      | 81.5                     | 34.1                        | 67.9                      |
| PT1_FF46                    | 10                     | 75.1                  | 130        | 105.8                     | 135.3                    | 50.0                        | 121.2                     |
| SPT_16_MD_30                | 16                     | 54.7                  | 30         | 29.2                      | 15.4                     | 13.1                        | 3.8                       |
| SPT_16_MD_80                | 16                     | 58.5                  | 80         | 81.4                      | 50.1                     | 35.2                        | 22.9                      |
| SPT_16_HD_30                | 16                     | 81.5                  | 30         | 31.8                      | 49.5                     | 13.1                        | 53.5                      |
| SPT_16_HD_80                | 16                     | 83.5                  | 80         | 87.3                      | 108                      | 35.2                        | 106.2                     |
| PULL 1                      | 32                     | 44.4                  | 30         | 29.3                      | 19.9                     | 18.5                        | 2.2                       |
| PULL 2                      | 32                     | 45.5                  | 80         | 77.3                      | 49.1                     | 47.1                        | 3.1                       |
| PULL 3                      | 32                     | 50.0                  | 130        | 127.5                     | 79.9                     | 76.9                        | 4.6                       |
| PULL 8                      | 32                     | 45.9                  | 30         | 29.1                      | 19.3                     | 17.3                        | 3.0                       |
| PULL 9                      | 32                     | 51.3                  | 80         | 78.1                      | 49.2                     | 48.6                        | 1.0                       |
| PULL 4                      | 32                     | 81.4                  | 130        | 138.3                     | 129                      | 76.9                        | 70.2                      |
| PULL 5                      | 32                     | 84.3                  | 80         | 86.5                      | 74.3                     | 47.1                        | 32.6                      |
| PULL 6                      | 32                     | 83.9                  | 30         | 32                        | 35.9                     | 17.3                        | 25.7                      |
| PULL 7                      | 32                     | 84.5                  | 30         | 32.3                      | 42.2                     | 17.3                        | 35.2                      |
| PULL 10                     | 32                     | 84.0                  | 80         | 85.7                      | 85.9                     | 47.1                        | 51.4                      |
| PULL 11                     | 32                     | 85.0                  | 130        | 139.3                     | 141                      | 76.9                        | 87.7                      |
| PULL 12                     | 32                     | 84.6                  | 30         | 32.5                      | 43.2                     | 17.3                        | 36.5                      |

-Tabella 4.3a – Quadro riassuntivo dei valori di Δσ'<sub>n</sub> calcolati con (4.18) e (4.19), per le prove di trazione.

| Prove di carico in compressione |               |              |              |                         |                      |                         |                            |
|---------------------------------|---------------|--------------|--------------|-------------------------|----------------------|-------------------------|----------------------------|
| Nome prova                      | Modello       |              |              |                         | Valori al picco      |                         |                            |
|                                 | $d_m$<br>[mm] | $D_R$<br>[%] | $a/g$<br>[-] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{su}$<br>[kPa] | $\tau_{cv MD}$<br>[kPa] | $\Delta\sigma'_n$<br>[kPa] |
| SPC_8_MD_30                     | 8             | 50.3         | 30           | 15.6                    | 15.2                 | 10.0                    | 8.0                        |
| SPC_8_MD_60                     | 8             | 52.7         | 60           | 31.2                    | 31.8                 | 23.6                    | 12.6                       |
| SPC_8_MD_120                    | 8             | 55.2         | 120          | 63.1                    | 60.7                 | 44.9                    | 24.3                       |
| SPC_8_MD_160                    | 8             | 57.9         | 160          | 83.4                    | 70.5                 | 56.7                    | 21.3                       |
| SPC_8_HD_30                     | 8             | 81.5         | 30           | 16.7                    | 37.2                 | 10.0                    | 40.7                       |
| SPC_8_HD_60                     | 8             | 82.5         | 60           | 33.6                    | 56.0                 | 23.6                    | 47.5                       |
| SPC_8_HD_120                    | 8             | 82.8         | 120          | 67.2                    | 99.2                 | 44.9                    | 79.5                       |
| SPC_8_HD_160                    | 8             | 83.2         | 160          | 87.8                    | 114.0                | 56.7                    | 83.8                       |
| PT3a_FF1                        | 10            | 56.2         | 30           | 24.5                    | 13.6                 | 10.0                    | 5.5                        |
| PT3a_FF7                        | 10            | 43.5         | 30           | 23.6                    | 20.4                 | 16.5                    | 5.9                        |
| PT3a_FF8                        | 10            | 45.9         | 80           | 62.0                    | 42.7                 | 35.1                    | 11.7                       |
| PT3a_FF2                        | 10            | 41.7         | 80           | 60.6                    | 47.2                 | 39.0                    | 12.6                       |
| PT1_FF28                        | 10            | 50.9         | 80           | 63.3                    | 50.8                 | 45.2                    | 8.6                        |
| PT3a_FF6                        | 10            | 45.8         | 130          | 100.0                   | 77.0                 | 69.8                    | 11.1                       |
| PT3a_FF9                        | 10            | 85.1         | 30           | 26.7                    | 27.0                 | 10.0                    | 24.0                       |
| PT3a_FF3                        | 10            | 82.3         | 80           | 67.9                    | 59.7                 | 35.1                    | 32.0                       |
| PT3a_FF5                        | 10            | 83.7         | 130          | 111.5                   | 85.6                 | 69.8                    | 12.8                       |
| SPC_16_MD_30                    | 16            | 51.9         | 30           | 30.2                    | 27.0                 | 22.5                    | 6.9                        |
| SPC_16_MD_80                    | 16            | 57.4         | 80           | 80.1                    | 64.0                 | 56.4                    | 11.7                       |
| SPC_16_HD_30                    | 16            | 80.3         | 30           | 32.3                    | 54.7                 | 22.5                    | 47.5                       |
| SPC_16_HD_80                    | 16            | 83.2         | 80           | 93.3                    | 112.7                | 56.4                    | 73.5                       |

-Tabella 4.3b – Quadro riassuntivo dei valori di  $\Delta\sigma'_n$  calcolati con (4.18) e (4.19), per le prove di compressione.

Applicando la (4.18) e la (4.19) ai risultati delle prove di carico in centrifuga, per le quali il valore delle tensioni tangenziali sono noti e  $\sigma'_{n0}$  calcolati, è possibile stimare i contributi di  $\Delta\sigma'_n$ , a media e ad alta densità, che hanno portato al raggiungimento delle  $\tau_{su}$  massime.

In Tabella 4.3 sono riassunti i valori di  $\Delta\sigma'_{n|MD}$  e  $\Delta\sigma'_{n|HD}$  ricavati per le prove eseguite sui pali modello rugosi trivellati in sabbia secca FF, sottoposti rispettivamente a trazione, in Tabella 4.3a, e a compressione, in Tabella 4.3b.

I rapporti  $\Delta\sigma'_n/\sigma'_{n0}$  ottenuti dai valori raccolti nelle Tabelle 4.3a e 4.3b, sono mostrati graficamente in Figura 4.10.

Le variazioni tensionali calcolate per le prove a MD dalla (4.18) si presentano inferiori a quelle relative alle prove a HD, stimate con la (4.19): il risultato ottenuto rispecchia il differente comportamento che si instaura all'interfaccia palo-sabbia, responsabile dello sviluppo di  $\Delta\sigma'_n$ . Come osservato anche dai risultati delle prove di taglio diretto CNS, presentate al Capitolo 3, i depositi sabbiosi a maggiore densità relativa

sviluppano un comportamento dilatante che produce un incremento di tensione normale maggiore di quello generato in campioni a MD.

I dati presentati in Figura 4.10 sono approssimati da curve distinte in funzione dei due gradi di addensamento. Per le prove a MD:

$$\Delta\sigma'_n/\sigma'_{n0}=0.1(\sigma'_{n0}/p_a)^{-0.6} \quad [-] \quad (4.20)$$

Per le prove a HD:

$$\Delta\sigma'_n/\sigma'_{n0}=0.7(\sigma'_{n0}/p_a)^{-0.6} \quad [-] \quad (4.21)$$

Dalle (4.20) e (4.21) si osserva che l'incremento tensionale  $\Delta\sigma'_n$  aumenta con la tensione di confinamento, nell'intervallo di  $\sigma'_{n0}$  analizzato: il risultato appare concorde con i dati inizialmente riportati da Boulon e Foray [1986] di Figura 4.4, in cui il modulo pressimetrico  $E_p$  è funzione diretta della variazione di pressione normale al fusto. La sua validità appare comunque limitata a livelli di pressioni di confinamento medio-bassi, come quelli che competono ai pali investigati; per pressioni dell'ordine di qualche MPa, il comportamento della sabbia densa si modifica da dilatante a contraente e  $\Delta\sigma'_n$  decresce all'aumentare di  $\sigma'_{n0}$ , come documentato in Bolton [1986].

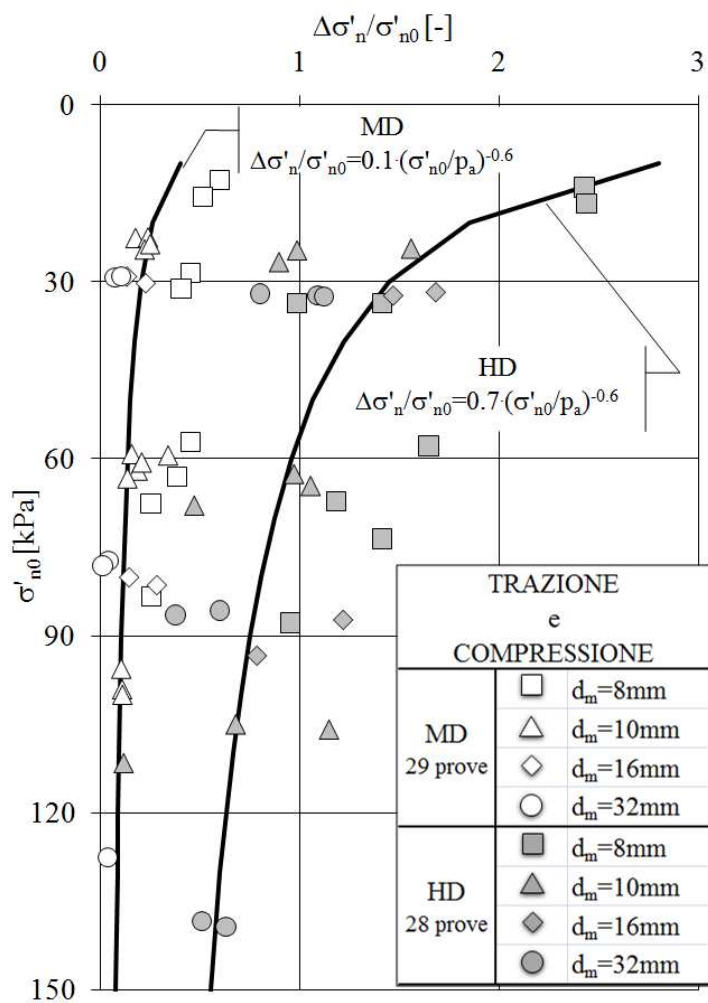
Poiché i valori di  $\Delta\sigma'_n$  di Figura 4.10, ottenuti dall'applicazione della metodologia semi-empirica derivata dall'elaborazione dei risultati delle prove in centrifuga, sembrano cogliere il corretto comportamento della sabbia all'interfaccia di un'inclusione rugosa, si è definita una funzione analitica per stimare il rapporto tensionale  $\Delta\sigma'_n/\sigma'_{n0}$  al variare della densità relativa,  $D_R$ , del deposito sabbioso analizzato, come presentato in Figura 4.11:

$$\Delta\sigma'_n/\sigma'_{n0}=(\sigma'_{n0}/p_a)^{-0.6}D_R^3 \quad [-] \quad (4.22)$$

Ricavando dall'applicazione della (4.22) i valori di  $\Delta\sigma'_n$  che competono alle singole prove di carico eseguite in centrifuga, raccolti in Tabella 4.4a per le prove di trazione e Tabella 4.4b per quelle di compressione, e utilizzando la (4.8) nelle stesse ipotesi di  $\sigma'_{nc}$  e  $\phi'_{cv}$  già presentate al Paragrafo 4.2, sono calcolati i valori  $\tau_{su|calc}$  da confrontare con  $\tau_{su|mis}$ , per stimare l'affidabilità della relazione proposta in (4.22).

I valori di  $\tau_{su|calc}$  rispetto a  $\tau_{su|mis}$  sono rappresentati in Figura 4.12, unitamente ad un fuso di errore di  $\pm 20\%$ .

I dati appaiono, per entrambe le  $D_R$ , contenuti all'interno della banda di errore ammissibile del 20%, con un andamento che si sviluppa attorno alla linea di ottimo.



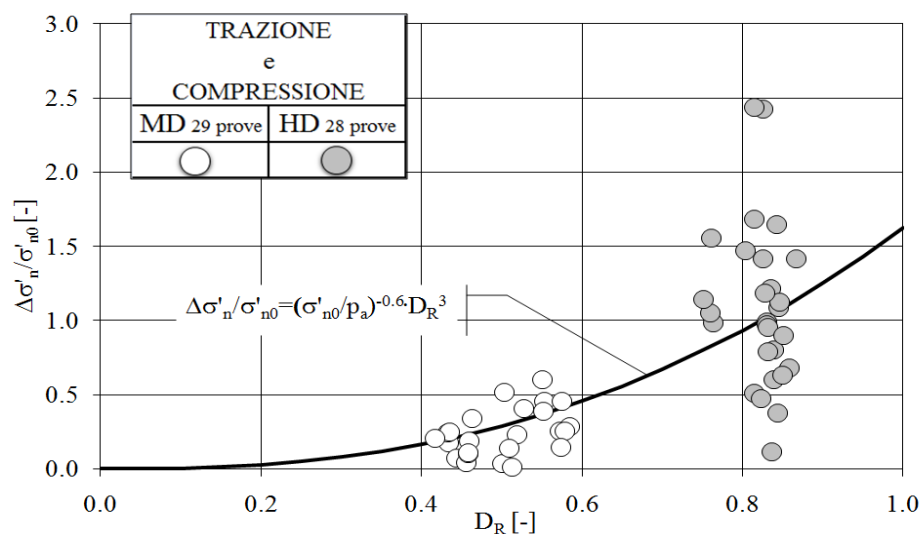
-Figura 4.10 – Andamento del rapporto  $\Delta\sigma'_n/\sigma'_{n0}$ , ottenuti dalle (4.18) e (4.19), rispetto a  $\sigma'_{n0}$  per prove di trazione e compressione su pali rugosi trivellati in centrifuga: MD e HD.

| Prove di carico in trazione |               |              |              |                         |                      |                            |
|-----------------------------|---------------|--------------|--------------|-------------------------|----------------------|----------------------------|
| Nome prova                  | Modello       |              |              |                         | Valori al picco      |                            |
|                             | $d_m$<br>[mm] | $D_R$<br>[%] | $a/g$<br>[-] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{su}$<br>[kPa] | $\Delta\sigma'_n$<br>[kPa] |
| SPT_8_MD_30                 | 8             | 55.1         | 30           | 12.8                    | 12.6                 | 7.4                        |
| SPT_8_MD_60                 | 8             | 55.3         | 60           | 28.5                    | 25.3                 | 10.3                       |
| SPT_8_MD_120                | 8             | 57.5         | 120          | 57.2                    | 49.5                 | 15.3                       |
| SPT_8_MD_160                | 8             | 57.2         | 160          | 67.6                    | 49.6                 | 16.1                       |
| SPT_8_HD_30                 | 8             | 82.6         | 30           | 14.0                    | 30.5                 | 25.8                       |
| SPT_8_HD_60                 | 8             | 83.0         | 60           | 33.7                    | 41.9                 | 37.2                       |
| SPT_8_HD_120                | 8             | 84.3         | 120          | 57.8                    | 93.2                 | 48.3                       |
| SPT_8_HD_160                | 8             | 86.7         | 160          | 73.6                    | 110                  | 57.9                       |
| PT1_FF32                    | 10            | 43.3         | 30           | 22.5                    | 15.5                 | 4.5                        |
| PT1_FF38                    | 10            | 50.5         | 80           | 59.2                    | 34.7                 | 10.5                       |
| PT1_FF31                    | 10            | 55.0         | 130          | 99.1                    | 54.2                 | 16.7                       |
| PT1_FF45                    | 10            | 43.3         | 30           | 22.4                    | 18.5                 | 4.5                        |
| PT1_FF44                    | 10            | 46.3         | 80           | 59.4                    | 47.3                 | 8.1                        |
| PT1_FF43                    | 10            | 44.8         | 130          | 95.6                    | 56.6                 | 8.9                        |
| PT1_FF29                    | 10            | 76.4         | 30           | 24.6                    | 30.0                 | 25.6                       |
| PT1_FF33                    | 10            | 83.0         | 80           | 32.6                    | 70.1                 | 47.7                       |
| PT1_FF30                    | 10            | 85.9         | 130          | 53.0                    | 97.0                 | 65.0                       |
| PT1_FF47                    | 10            | 76.1         | 30           | 24.3                    | 40.8                 | 25.1                       |
| PT1_FF42                    | 10            | 75.9         | 80           | 64.5                    | 81.5                 | 37.0                       |
| PT1_FF46                    | 10            | 75.1         | 130          | 105.8                   | 135.3                | 43.6                       |
| SPT_16_MD_30                | 16            | 54.7         | 30           | 29.2                    | 15.4                 | 10.1                       |
| SPT_16_MD_80                | 16            | 58.5         | 80           | 81.4                    | 50.1                 | 18.5                       |
| SPT_16_HD_30                | 16            | 81.5         | 30           | 31.8                    | 49.5                 | 34.4                       |
| SPT_16_HD_80                | 16            | 83.5         | 80           | 87.3                    | 108                  | 55.5                       |
| PULL 1                      | 32            | 44.4         | 30           | 29.3                    | 19.9                 | 5.4                        |
| PULL 2                      | 32            | 45.5         | 80           | 77.3                    | 49.1                 | 8.6                        |
| PULL 3                      | 32            | 50.0         | 130          | 127.5                   | 79.9                 | 13.9                       |
| PULL 8                      | 32            | 45.9         | 30           | 29.1                    | 19.3                 | 5.9                        |
| PULL 9                      | 32            | 51.3         | 80           | 78.1                    | 49.2                 | 12.3                       |
| PULL 4                      | 32            | 81.4         | 130          | 138.3                   | 129                  | 61.9                       |
| PULL 5                      | 32            | 84.3         | 80           | 86.5                    | 74.3                 | 57.0                       |
| PULL 6                      | 32            | 83.9         | 30           | 32                      | 35.9                 | 37.7                       |
| PULL 7                      | 32            | 84.5         | 30           | 32.3                    | 42.2                 | 38.6                       |
| PULL 10                     | 32            | 84.0         | 80           | 85.7                    | 85.9                 | 56.0                       |
| PULL 11                     | 32            | 85.0         | 130          | 139.3                   | 141                  | 70.6                       |
| PULL 12                     | 32            | 84.6         | 30           | 32.5                    | 43.2                 | 38.9                       |

*-Tabella 4.4a – Quadro riassuntivo dei valori di  $\Delta\sigma'_n$  calcolati con (4.22), per le prove di trazione.*

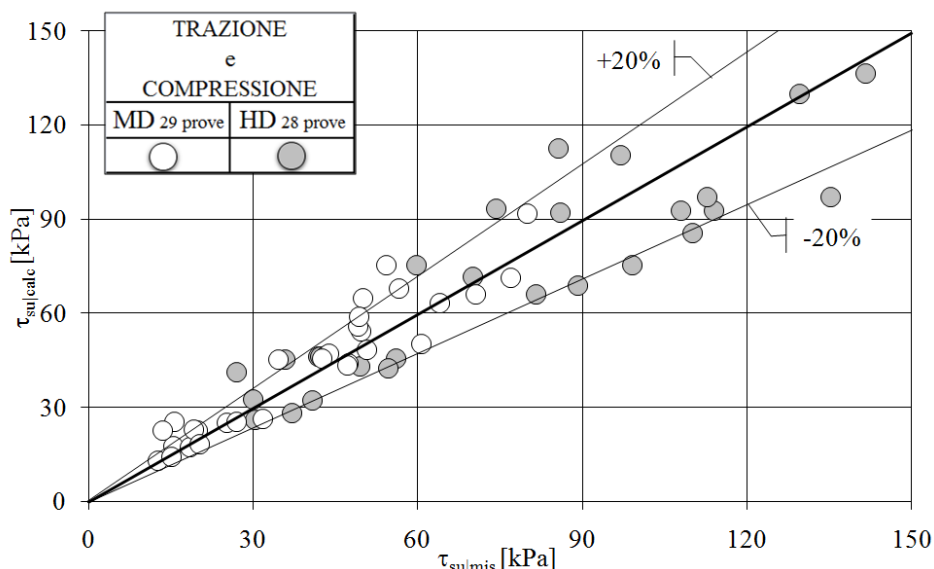
| Prove di carico in compressione |               |              |              |                         |                      |                            |
|---------------------------------|---------------|--------------|--------------|-------------------------|----------------------|----------------------------|
| Nome prova                      | Modello       |              |              |                         | Valori al picco      |                            |
|                                 | $d_m$<br>[mm] | $D_R$<br>[%] | $a/g$<br>[-] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{su}$<br>[kPa] | $\Delta\sigma'_n$<br>[kPa] |
| SPC_8_MD_30                     | 8             | 50.3         | 30           | 15.6                    | 15.2                 | 6.1                        |
| SPC_8_MD_60                     | 8             | 52.7         | 60           | 31.2                    | 31.8                 | 9.2                        |
| SPC_8_MD_120                    | 8             | 55.2         | 120          | 63.1                    | 60.7                 | 14.1                       |
| SPC_8_MD_160                    | 8             | 57.9         | 160          | 83.4                    | 70.5                 | 18.1                       |
| SPC_8_HD_30                     | 8             | 81.5         | 30           | 16.7                    | 37.2                 | 26.6                       |
| SPC_8_HD_60                     | 8             | 82.5         | 60           | 33.6                    | 56.0                 | 36.5                       |
| SPC_8_HD_120                    | 8             | 82.8         | 120          | 67.2                    | 99.2                 | 48.7                       |
| SPC_8_HD_160                    | 8             | 83.2         | 160          | 87.8                    | 114.0                | 55.0                       |
| PT3a_FF1                        | 10            | 56.2         | 30           | 24.5                    | 13.6                 | 10.2                       |
| PT3a_FF7                        | 10            | 43.5         | 30           | 23.6                    | 20.4                 | 4.6                        |
| PT3a_FF8                        | 10            | 45.9         | 80           | 62.0                    | 42.7                 | 8.1                        |
| PT3a_FF2                        | 10            | 41.7         | 80           | 60.6                    | 47.2                 | 6.0                        |
| PT1_FF28                        | 10            | 50.9         | 80           | 63.3                    | 50.8                 | 11.0                       |
| PT3a_FF6                        | 10            | 45.8         | 130          | 100.0                   | 77.0                 | 9.7                        |
| PT3a_FF9                        | 10            | 85.1         | 30           | 26.7                    | 27.0                 | 36.5                       |
| PT3a_FF3                        | 10            | 82.3         | 80           | 67.9                    | 59.7                 | 48.1                       |
| PT3a_FF5                        | 10            | 83.7         | 130          | 111.5                   | 85.6                 | 61.6                       |
| SPC_16_MD_30                    | 16            | 51.9         | 30           | 30.2                    | 27.0                 | 8.7                        |
| SPC_16_MD_80                    | 16            | 57.4         | 80           | 80.1                    | 64.0                 | 17.4                       |
| SPC_16_HD_30                    | 16            | 80.3         | 30           | 32.3                    | 54.7                 | 33.2                       |
| SPC_16_HD_80                    | 16            | 83.2         | 80           | 93.3                    | 112.7                | 56.3                       |

-Tabella 4.4b – Quadro riassuntivo dei valori di  $\Delta\sigma'_n$  calcolati con (4.22), per le prove di compressione.



-Figura 4.11 – Relazione tra il rapporto  $\Delta\sigma'_n/\sigma'_{n0}$  e la  $D_R$  per prove di trazione e compressione su pali rugosi trivellati in centrifuga: MD e HD.





-Figura 4.12 – Confronto tra  $\tau_{su/cale}$  e  $\tau_{su/mis}$  per prove in trazione e compressione eseguite su pali modello trivellati in sabbia FF testati in centrifuga: MD e HD e  $\Delta\sigma'_n$  da eq.ne (4.22).

#### 4.3.1 EFFETTI SCALA SULLA TENSIONE TANGENZIALE $\tau_{su}$

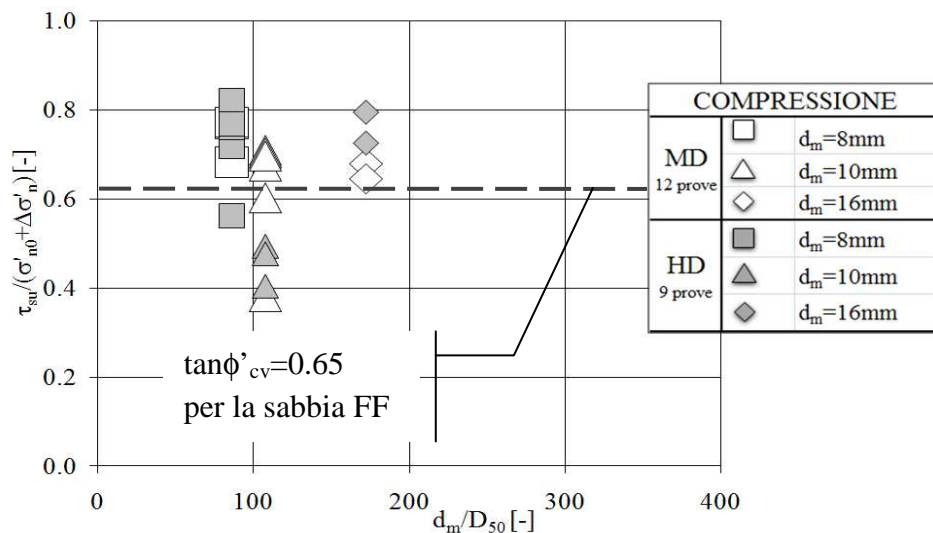
L'effetto scala relativo alla dimensione delle particelle di sabbia  $D_{50}$ , già analizzato al Capitolo 2 per gli spostamenti al picco tensionale  $w_{su}$ , è associato alla problematica di non poter scalare, passando dal prototipo al modello, la dimensione dei grani di terreno, nell'ipotesi di impiegare per entrambi lo stesso materiale. L'accelerazione imposta al modello potrebbe produrre delle tensioni tangenziali al picco funzione della dimensione media delle particelle di sabbia [Bolton e Lau 1988].

In Figura 4.13a sono riportati i valori di  $\tau_{su}$ , calcolati al Capitolo 2 per i pali modello rugosi trivellati in sabbia FF, normalizzati per lo stato tensionale normale corrente, con  $\Delta\sigma'_n$  stimato dalla (4.22), in funzione del rapporto  $d_m/D_{50}$ . Analogamente, in Figura 4.13b, sono riportati i valori tensionali di picco  $\tau_{su}$  ottenuti dalle prove di trazione, elaborate al Capitolo 2, normalizzati per la tensione normale corrente, con  $\Delta\sigma'_n$  stimato dalla (4.22), diagrammati rispetto a  $d_m/D_{50}$ .

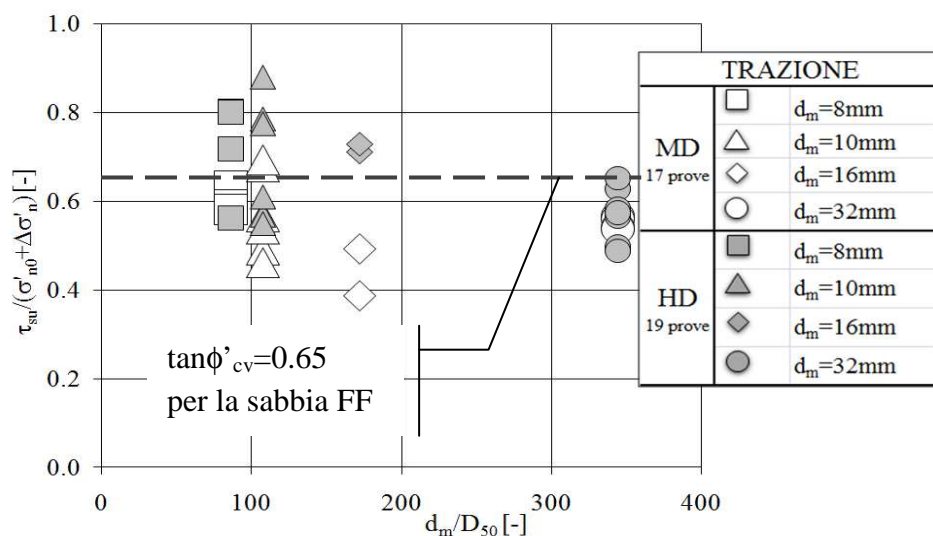
Per  $d_m/D_{50} \geq 80$  le tensioni tangenziali normalizzate non appaiono dipendenti dalla dimensione del palo modello rispetto a quella delle particelle di sabbia (Figg. 4.13a e 4.13b) [Fioravante et al. 2008]: i punti si dispongono, a meno di una certa dispersione, attorno al valore  $\tan\phi'_{cv}=0.65$  per la sabbia FF.

Le prove di trazione condotte su palo modello di  $d_m=32$  mm si assestano su valori prossimi a 0.65, in linea con quelli ottenuti per i pali strumentati: il risultato indica che l'assunzione della zona detensionata alla base (Cap. 2), eseguita sul palo non strumentato, è ragionevole (Fig. 4.13b).

Confrontando la Figura 4.13a con la Figura 4.13b non appare evidente un'influenza della direzione del carico assiale sul risultato ottenuto.



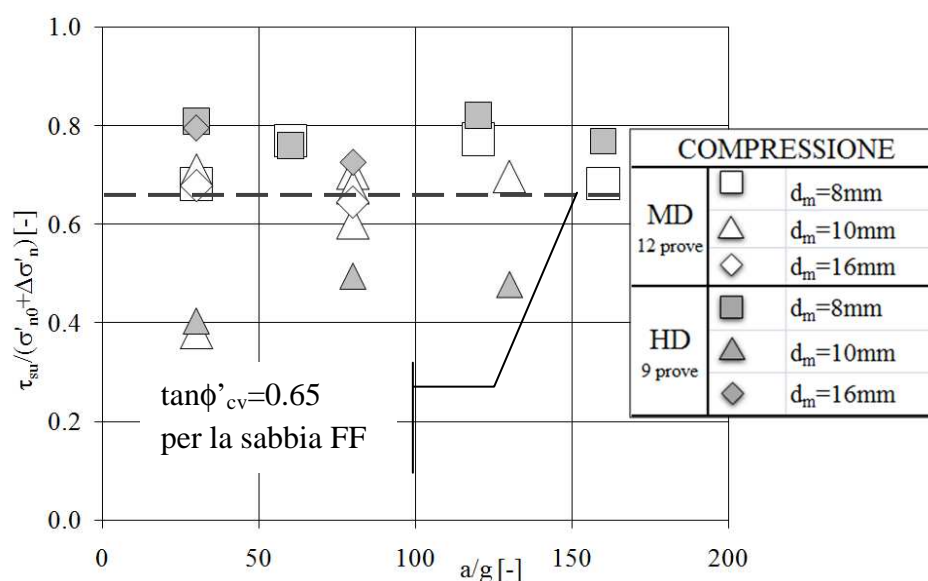
-Figura 4.13a – Effetto scala  $d_m/D_{50}$  su  $\tau_{su}$  per prove di compressione su pali modello rugosi trivellati in sabbia FF.



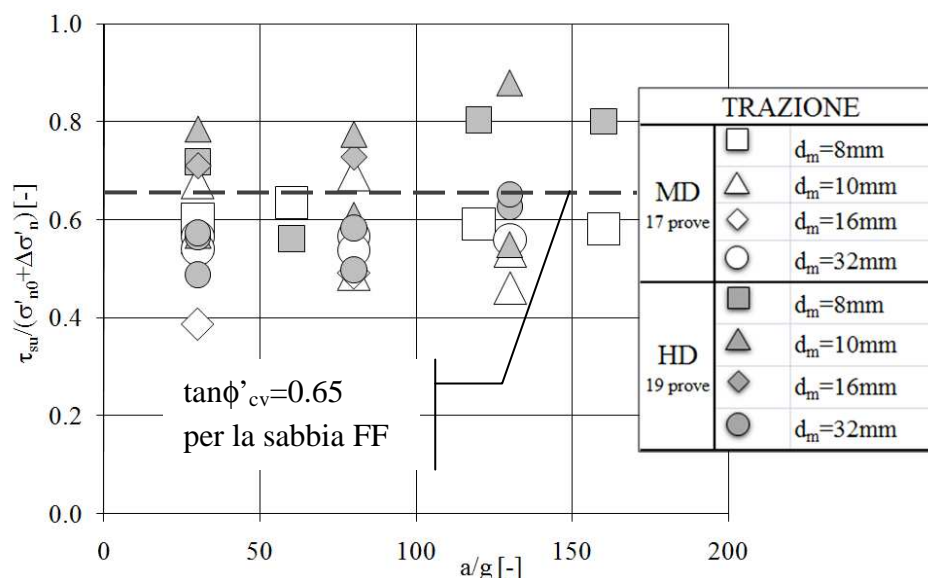
-Figura 4.13b – Effetto scala  $d_m/D_{50}$  su  $\tau_{su}$  per prove di trazione su pali modello rugosi trivellati in sabbia FF.

In Figura 4.14a sono riportati i valori di  $\tau_{su}$ , ottenuti dall'elaborazione delle prove in centrifuga a compressione illustrata al Capitolo 2, normalizzati per la tensione normale corrente, con  $\Delta\sigma'_n$  stimato dalla (4.22), in funzione del livello a/g della prova. Analogamente in Figura 4.14b, sono diagrammati i rapporti tra  $\tau_{su}$  e la tensione normale corrente, con  $\Delta\sigma'_n$  calcolato dalla (4.22), rispetto al livello di accelerazione di prova a/g.

Dai dati mostrati nelle Figure 4.14a e 4.14b, non si rintraccia una dipendenza della tensione tangenziale di picco dal valore dell'accelerazione di prova per  $a/g \geq 30$  [Fioravante et al. 2008]. Confrontando le Figure 4.14a e 4.14b, non appare evidente una influenza della direzione del carico assiale sul risultato ottenuto.



-Figura 4.14a – Effetto scala a/g su  $\tau_{su}$  per prove di compressione su pali modello rugosi trivellati in sabbia FF.



-Figura 4.14b – Effetto scala  $a/g$  su  $\tau_{su}$  per prove di trazione su pali modello rugosi trivellati in sabbia FF.

#### 4.4 DETERMINAZIONE DI $\tau_{su}$ DA METODO $\beta$

Il coefficiente di trasferimento dell'attrito laterale  $\beta$  è calcolato dai risultati delle prove di carico eseguite in centrifuga sui pali modello rugosi trivellati in sabbia FF secca, utilizzando l'espressione analitica:

$$\beta = \tau_{su}/\sigma'_{v0} \quad [-] \quad (4.23)$$

Con:

$\tau_{su}$  = tensione tangenziale al picco, calcolata come descritto al Capitolo 2

$\sigma'_{v0}$  = tensione verticale efficace stimata alla fine della consolidazione

I valori di  $\beta$  ottenuti dall'interpretazione delle prove di trazione sono riassunti in Tabella 4.5a, mentre quelli da prove di compressione in Tabella 4.5b.

In Figura 4.15, sono rappresentati graficamente i coefficienti di trasferimento dell'attrito laterale ottenuti dai dati relativi alle prove di carico in centrifuga eseguite su campioni di sabbia secca FF deposta a media densità, riferiti alla profondità media del palo esaminato  $L_p/2$ .

Tali valori sono integrati da altri reperi in letteratura, riferiti a pali in vera grandezza trivellati in siti granulari prevalentemente sabbiosi aventi grado di addensamento medio [ Sowa 1970; Kulhawy et al. 1979; Tucker 1989; Gatti e Garassino 1989; Ismael 1989; Fujioka e Yamada 1997; Tan

et al. 1998; Yasufuku et al. 1997; Krabbenhoft et al. 2006; Huybrechts e Maertens 2008; Le Kouby et al. 2008].

Dall'osservazione della Figura 4.15 si è rilevato un buon accordo tra la distribuzione dei coefficienti ricavati da prove in centrifuga e quelli ottenuti da pali in vera grandezza.

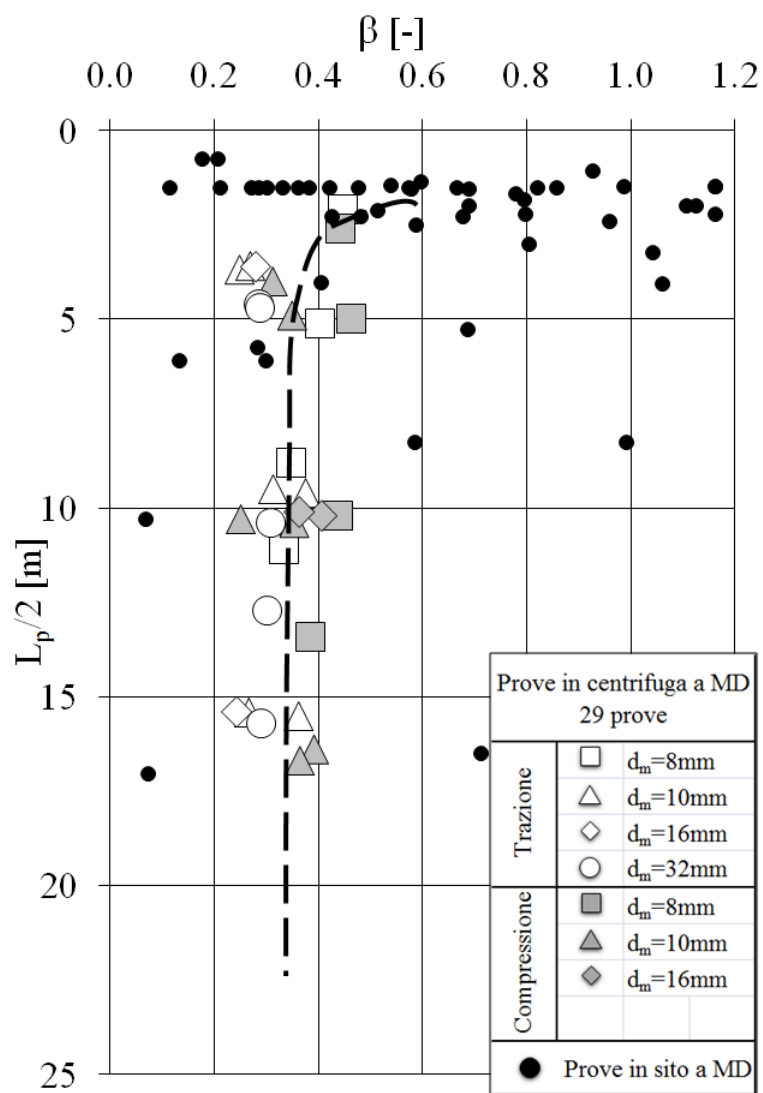
L'andamento di  $\beta$  appare leggermente decrescente, con valori compresi tra 0.45 in superficie e 0.31 in profondità [Chen e Kulhawy 1994]. Il limite inferiore di  $\beta$  è prossimo al prodotto tra il coefficiente di spinta a riposo  $k_0$ , attribuito alla sabbia FF, e la tangente dell'angolo  $\phi'_{cv}$  di  $33^\circ$ .

Analogamente, in Figura 4.16 sono rappresentati i valori di  $\beta$  ricavati dalle prove in centrifuga eseguite su modelli ad alta densità, riferiti alla profondità media del palo esaminato  $L_p/2$ .

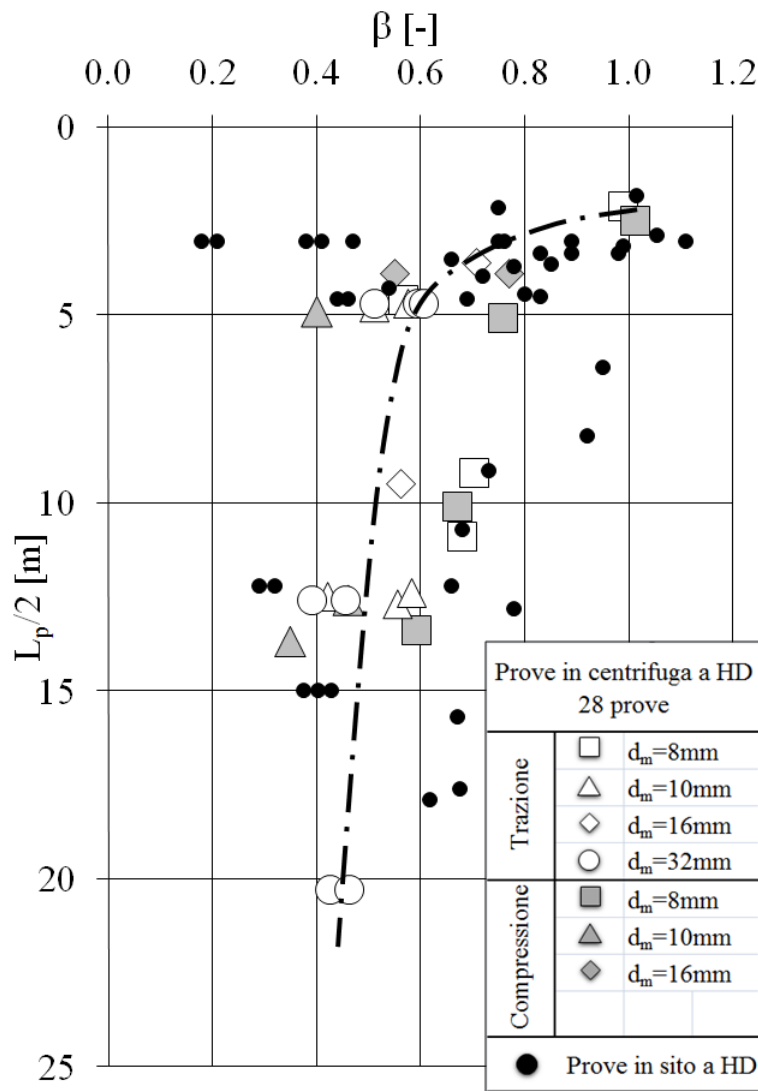
I dati sono integrati da altri reperiti in letteratura ricavati da prove di carico su pali in vera grandezza trivellati in terreni granulari a HD [Kulhawy et al. 1979; Kostantinidis et al. 1987; Tucker 1987; Collotta et al. 1989; Rocchi et al. 1989; Chen e Kulhawy 1994; Tan et al. 1998; Maertens et al. 2003; Rocher-Lacoste et al. 2008;]. L'andamento dei coefficienti  $\beta$  riferiti a HD è decrescente con la profondità, mostrandosi in buon accordo con i valori di sito: esso è compreso tra 1 in superficie e 0.4 in profondità.

Confrontando le prove in centrifuga ai due diversi gradi di addensamento (Figg. 4.15 e 4.16) è possibile rilevare una netta distinzione nei due andamenti ottenuti: valori di  $\beta$  maggiori competono a modelli a HD, che si riducono con la profondità avvicinandosi progressivamente ai valori che competono alla MD [Fioravante et al. 2008]. Tale risultato non è in accordo con precedenti evidenze sperimentali in sito [Reese e O'Neill 1988; O'Neill e Hassan 1994] che mostrano coefficienti  $\beta$  simili per entrambi i gradi di addensamento: l'analogo comportamento rilevato potrebbe dipendere dal maggiore disturbo che si induce in depositi sabbiosi a HD durante l'installazione del palo in vera grandezza.

La riduzione di  $\beta$  con la profondità, ancora non completamente compresa, sembra legata all'aumento della pressione di confinamento  $\sigma'_{n0}$ . Se si confrontano gli andamenti decrescenti di  $\beta$  a MD e HD (Figg. 4.15 e 4.16) con quelli ottenuti in precedenza (Fig. 4.10) per il rapporto  $\Delta\sigma'_n/\sigma'_{n0}$ , essi appaiono simili. Sembra quindi ragionevole pensare che la riduzione del coefficiente di trasferimento dell'attrito laterale possa essere connesso alla riduzione dell'effetto di  $\Delta\sigma'_n$  al crescere della profondità.



-Figura 4.15- Coefficienti  $\beta$ , da prove in centrifuga e in sito, riferiti a terreni granulari sabbiosi: campioni e depositi a MD.



-Figura 4.16- Coefficienti  $\beta$ , da prove in centrifuga e in sito, riferiti a terreni granulari sabbiosi: campioni e depositi a HD.

Nelle Figure 4.15 e 4.16 appare influente la direzione del carico assiale agente sul palo: le prove a trazione e a compressione, eseguite sia su pali in vera grandezza che in centrifuga, sviluppano coefficienti  $\beta$  comparabili, confermando la medesima conclusione proposta da Chen e Kulhawy [1994].

| Prove di carico in trazione |               |              |              |                         |                      |                |
|-----------------------------|---------------|--------------|--------------|-------------------------|----------------------|----------------|
| Nome prova                  | Modello       |              |              |                         | Valori al picco      |                |
|                             | $d_m$<br>[mm] | $D_R$<br>[%] | $a/g$<br>[-] | $\sigma'_{v0}$<br>[kPa] | $\tau_{su}$<br>[kPa] | $\beta$<br>[-] |
| SPT_8_MD_30                 | 8             | 55.1         | 30           | 28                      | 12.6                 | 0.45           |
| SPT_8_MD_60                 | 8             | 55.3         | 60           | 63                      | 25.3                 | 0.40           |
| SPT_8_MD_120                | 8             | 57.5         | 120          | 126                     | 49.5                 | 0.35           |
| SPT_8_MD_160                | 8             | 57.2         | 160          | 149                     | 49.6                 | 0.33           |
| SPT_8_HD_30                 | 8             | 82.6         | 30           | 31                      | 30.5                 | 0.99           |
| SPT_8_HD_60                 | 8             | 83.0         | 60           | 74                      | 41.9                 | 0.57           |
| SPT_8_HD_120                | 8             | 84.3         | 120          | 127                     | 93.2                 | 0.70           |
| SPT_8_HD_160                | 8             | 86.7         | 160          | 162                     | 110                  | 0.68           |
| PT1_FF32                    | 10            | 43.3         | 30           | 49                      | 15.5                 | 0.31           |
| PT1_FF38                    | 10            | 50.5         | 80           | 130                     | 34.7                 | 0.27           |
| PT1_FF31                    | 10            | 55.0         | 130          | 218                     | 54.2                 | 0.25           |
| PT1_FF45                    | 10            | 43.3         | 30           | 49                      | 18.5                 | 0.38           |
| PT1_FF44                    | 10            | 46.3         | 80           | 131                     | 47.3                 | 0.36           |
| PT1_FF43                    | 10            | 44.8         | 130          | 210                     | 56.6                 | 0.27           |
| PT1_FF29                    | 10            | 76.4         | 30           | 54                      | 30.0                 | 0.55           |
| PT1_FF33                    | 10            | 83.0         | 80           | 137                     | 70.1                 | 0.51           |
| PT1_FF30                    | 10            | 85.9         | 130          | 231                     | 97.0                 | 0.42           |
| PT1_FF47                    | 10            | 76.1         | 30           | 53                      | 40.8                 | 0.76           |
| PT1_FF42                    | 10            | 75.9         | 80           | 142                     | 81.5                 | 0.57           |
| PT1_FF46                    | 10            | 75.1         | 130          | 233                     | 135.3                | 0.58           |
| SPT_16_MD_30                | 16            | 54.7         | 30           | 64                      | 15.4                 | 0.24           |
| SPT_16_MD_80                | 16            | 58.5         | 80           | 179                     | 50.1                 | 0.28           |
| SPT_16_HD_30                | 16            | 81.5         | 30           | 70                      | 49.5                 | 0.71           |
| SPT_16_HD_80                | 16            | 83.5         | 80           | 192                     | 108                  | 0.56           |
| PULL 1                      | 32            | 44.4         | 30           | 64                      | 19.9                 | 0.31           |
| PULL 2                      | 32            | 45.5         | 80           | 170                     | 49.1                 | 0.29           |
| PULL 3                      | 32            | 50.0         | 130          | 280                     | 79.9                 | 0.29           |
| PULL 8                      | 32            | 45.9         | 30           | 64                      | 19.3                 | 0.30           |
| PULL 9                      | 32            | 51.3         | 80           | 172                     | 49.2                 | 0.29           |
| PULL 4                      | 32            | 81.4         | 130          | 304                     | 129                  | 0.43           |
| PULL 5                      | 32            | 84.3         | 80           | 190                     | 74.3                 | 0.39           |
| PULL 6                      | 32            | 83.9         | 30           | 70                      | 35.9                 | 0.51           |
| PULL 7                      | 32            | 84.5         | 30           | 71                      | 42.2                 | 0.60           |
| PULL 10                     | 32            | 84.0         | 80           | 188                     | 85.9                 | 0.46           |
| PULL 11                     | 32            | 85.0         | 130          | 306                     | 141                  | 0.46           |
| PULL 12                     | 32            | 84.6         | 30           | 71                      | 43.2                 | 0.61           |

*-Tabella 4.5a – Quadro riassuntivo dei valori di  $\beta$  per le prove di trazione in centrifuga.*



| Prove di carico in compressione |               |              |              |                         |                      |                |
|---------------------------------|---------------|--------------|--------------|-------------------------|----------------------|----------------|
| Nome prova                      | Modello       |              |              |                         | Valori al picco      |                |
|                                 | $d_m$<br>[mm] | $D_R$<br>[%] | $a/g$<br>[-] | $\sigma'_{v0}$<br>[kPa] | $\tau_{su}$<br>[kPa] | $\beta$<br>[-] |
| SPC_8_MD_30                     | 8             | 50.3         | 30           | 34                      | 15.2                 | 0.44           |
| SPC_8_MD_60                     | 8             | 52.7         | 60           | 69                      | 31.8                 | 0.46           |
| SPC_8_MD_120                    | 8             | 55.2         | 120          | 139                     | 60.7                 | 0.44           |
| SPC_8_MD_160                    | 8             | 57.9         | 160          | 183                     | 70.5                 | 0.38           |
| SPC_8_HD_30                     | 8             | 81.5         | 30           | 37                      | 37.2                 | 1.01           |
| SPC_8_HD_60                     | 8             | 82.5         | 60           | 74                      | 56.0                 | 0.76           |
| SPC_8_HD_120                    | 8             | 82.8         | 120          | 148                     | 99.2                 | 0.67           |
| SPC_8_HD_160                    | 8             | 83.2         | 160          | 193                     | 114.0                | 0.59           |
| PT3a_FF1                        | 10            | 56.2         | 30           | 54                      | 13.6                 | 0.25           |
| PT3a_FF7                        | 10            | 43.5         | 30           | 52                      | 20.4                 | 0.39           |
| PT3a_FF8                        | 10            | 45.9         | 80           | 136                     | 42.7                 | 0.31           |
| PT3a_FF2                        | 10            | 41.7         | 80           | 133                     | 47.2                 | 0.35           |
| PT1_FF28                        | 10            | 50.9         | 80           | 139                     | 50.8                 | 0.37           |
| PT3a_FF6                        | 10            | 45.8         | 130          | 220                     | 77.0                 | 0.35           |
| PT3a_FF9                        | 10            | 85.1         | 30           | 59                      | 27.0                 | 0.46           |
| PT3a_FF3                        | 10            | 82.3         | 80           | 149                     | 59.7                 | 0.40           |
| PT3a_FF5                        | 10            | 83.7         | 130          | 245                     | 85.6                 | 0.35           |
| SPC_16_MD_30                    | 16            | 51.9         | 30           | 66                      | 27.0                 | 0.41           |
| SPC_16_MD_80                    | 16            | 57.4         | 80           | 176                     | 64.0                 | 0.36           |
| SPC_16_HD_30                    | 16            | 80.3         | 30           | 71                      | 54.7                 | 0.77           |
| SPC_16_HD_80                    | 16            | 83.2         | 80           | 205                     | 112.7                | 0.55           |

*-Tabella 4.5b – Quadro riassuntivo dei valori di  $\beta$  per le prove di compressione in centrifuga.*



## CAPITOLO 5

---

### VALUTAZIONE DELLA CAPACITÀ PORTANTE DI BASE

---

#### 5.1 INTRODUZIONE

La mobilitazione della portata di base e il suo valore limite  $Q_{bu}$  sono fortemente condizionati dal metodo di installazione del palo.

Per pali infissi il raggiungimento del valore ultimo avviene per cedimenti pari a circa il 10% del diametro  $D$  del palo stesso.

Diversamente, per i pali trivellati la portata di base limite  $Q_{bu}$  si mobilita per cedimenti uguali o maggiori del 100% del diametro del palo a causa di fenomeni di rigonfiamento e detensionamento del terreno indotti dalla realizzazione del foro [De Beer 1988; Franke 1989; Fioravante 1994; Balachowski 1995; Lancellotta e Calavera 1999; Jamiolkowski e Sarri 2000; Sarri 2001; Colombi 2005].

Poiché il cedimento necessario a raggiungere  $Q_{bu}$  è in generale eccessivo per le condizioni di servizio della sovrastruttura, ai fini progettuali occorre far riferimento ad un valore inferiore, definito “critico”, corrispondente alla capacità mobilitata per un cedimento “critico”.

Nella pratica progettuale, la portata di base critica,  $Q_{b|crit}$ , è associata ad un cedimento del palo compreso tra il 5% e il 10% del diametro [Bustamante e Ganeselli 1981; De Beer 1988; Jamiolkowski e Lancellotta 1988; Van Impe et al. 1988; Reese e O'Neill 1988; Franke 1989; Ghionna et al. 1993; O'Neill e Hassan 1994; Chen e Kulhawy 1994; Balachowski 1995; O'Neill e Reese 1999; Jamiolkowski 2000; Sarri 2001; Jamiolkowski 2003; Colombi 2005].

La portata di base critica del palo isolato trivellato in sabbia è espressa come:

$$Q_{b|crit} = q_{b|crit} A_b \quad [F] \quad (5.1)$$

Con:

$q_{b|crit} =$  portata di base unitaria critica, mobilitata ad un prefissato  $(w/D)_{crit}$   
 $A_b = \pi D^2/4$ , area di base del palo

Il valore di  $q_{b|crit}$  può essere valutato principalmente attraverso due approcci: il primo mutuato dalla teoria della capacità portante delle fondazioni superficiali, proposto da Berezantzev [1963, 1970], il secondo da correlazioni dirette con i risultati di prove penetrometriche statiche, CPT.

Berezantzev [1963; 1970], simulando il comportamento del terreno come elasto-plastico ed interpretando i risultati di un'ampia campagna di prove a 1g su un palo modello trivellato in una sabbia silicea ha proposto la seguente correlazione semi-empirica:

$$q_{b|crit} = B_k \cdot \gamma \cdot D \quad [FL^{-2}] \quad (5.2)$$

Con:

$B_k$  = fattore adimensionale di capacità portante, funzione dell'angolo di resistenza al taglio di picco  $\phi'_p$ , stimato in prossimità della base, e della snellezza del palo,  $L/D$ ;  $B_k$  è determinabile in Figura 5.1

$\gamma$  = peso per unità di volume alleggerito del terreno

$D$  = diametro di base del palo

La stima della  $q_{b|crit}$  che si ottiene applicando la (5.2) è relativa a un valore  $w/D$  circa pari al 20%, come indicato dallo stesso Autore, rapporto superiore a quelli correntemente impiegati nella pratica progettuale.

L'angolo di resistenza al taglio della sabbia in corrispondenza del picco tensionale, necessario per la determinazione di  $B_k$  (Fig. 5.1), può essere stimato partendo dall'angolo a volume costante  $\phi'_{cv}$  ed applicando la correlazione di Bolton [1986]. L'angolo  $\phi'_p$  non è un parametro caratteristico del terreno granulare impiegato ma dipende, oltre che dalla natura del materiale granulare, del suo grado di addensamento e del livello tensionale efficace a rottura:

$$\phi'_p = \phi'_{cv} + m \{ D_R [Q - \ln(p'_f)] - R \} \quad [^\circ] \quad (5.3)$$

Con:

$m$  = coefficiente uguale a 3 per condizioni deformative assialsimmetriche (TX), uguale a 5 in condizioni di deformazione piana

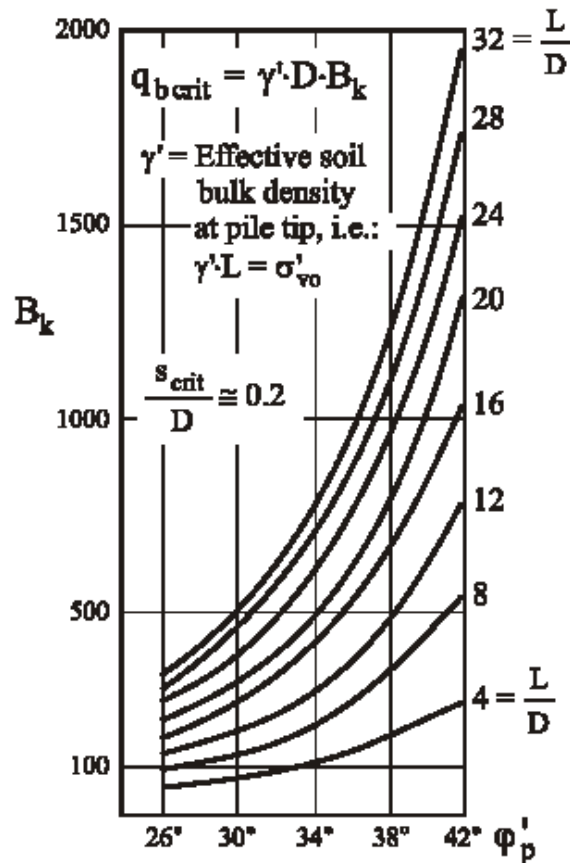
$Q$  = parametro caratteristico della sabbia testata, dipendente dalla composizione mineralogica, dalla compressibilità e dalla

frantumabilità dei grani ( $Q=9.8$  per sabbia Toyoura [Jamiolkowski et al. 2003])

$p'_f$  = pressione efficace media a rottura

$R$  = coefficiente funzione dell'angolo di resistenza al taglio a volume costante e di quello residuo, normalmente assunto unitario per le sabbie

$D_R$  = densità relativa del deposito di sabbia, stimabile attraverso correlazioni con risultati di prove in sito [Gibbs e Holtz 1957; Lancellotta 1983; Baldi et al. 1986; Marchetti 1997; Jamiolkowski et al. 2003].



-Figura 5.1 – Abaco per la stima di  $B_k$  per pali trivellati in sabbia [Berezantzev 1970].

Non ci sono soluzioni in letteratura che permettano di valutare la tensione media efficace a rottura in quanto dipendente dalle condizioni al contorno. Per fondazioni circolari profonde è possibile utilizzare, per

percorsi di carico in compressione, la seguente espressione approssimata [Fleming et al. 1992]:

$$p'_f = \sigma'_{ff} \frac{3 - \sin \phi'_{op}}{3 \cos^2 \phi'_{op}} \quad [FL^{-2}] \quad (5.4)$$

Con:

$$\sigma'_{ff} = \sigma'_{v0} \sqrt{N_q} \quad [FL^{-2}] \quad (5.5)$$

$\sigma'_{ff}$  = pressione efficace a rottura sotto la base del palo

$\sigma'_{v0}$  = tensione efficace verticale geostatica

$N_q$  = fattore di capacità portante funzione di  $\phi'$

$\phi'_{op}$  = angolo di resistenza al taglio agente in prossimità della base del palo.

Una determinazione diretta di  $\phi'_p$  può essere eseguita sulla base dei risultati di prove in sito utilizzando le formule della capacità portante [Durgunoglu e Mitchell 1995; Jamiolkowski 1990] o la teoria della cavità espansa [Vesic 1977; Yu e Houlsby 1991; Yu 2000].

Il secondo approccio fornisce delle correlazioni empiriche per valutare  $q_{b|crit}$  dai risultati di prove penetrometriche statiche [Bustamente e Gianceselli 1982; De Beer 1988; Van Impe et al. 1988; Jamiolkowski e Lancellotta 1988; Alsamman 1995; Fioravante et al. 1995]:

$$q_{b|crit} = \alpha_c q_c \quad [FL^{-2}] \quad (5.6)$$

Con:

$q_c$  = resistenza alla punta penetrometrica media, misurata in un intervallo di profondità compreso tra  $L-1.5D \leq z \leq L+1.5D$ , con D diametro del palo

$\alpha_c$  = fattore di correlazione empirico, funzione della natura del terreno, del suo stato iniziale e del metodo di installazione del palo.

I valori presentati in Tabella 5.1 ricavati da analisi numerica e da modellazione fisica in centrifuga, mostrano che il valore di  $\alpha_c$  decresce all'aumentare della densità relativa.

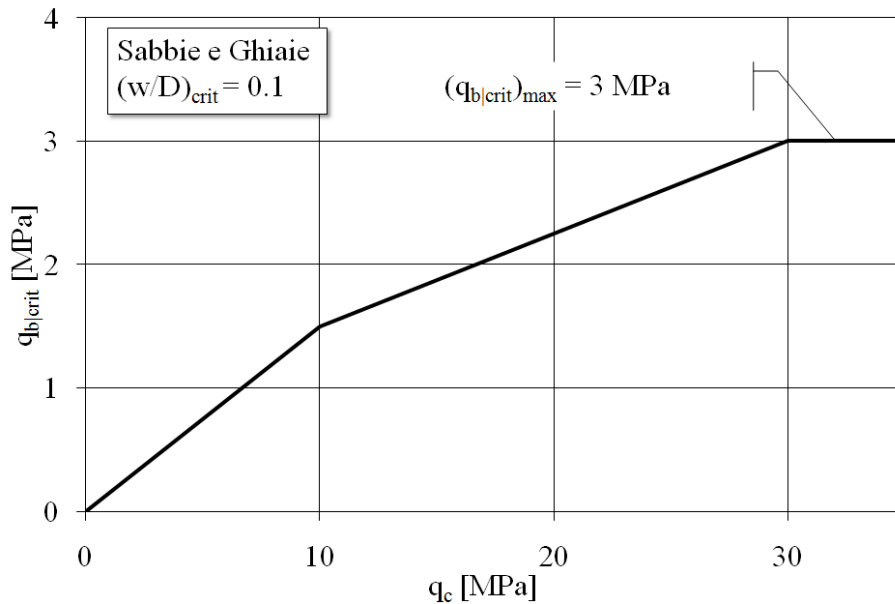
| Fonte dati   | Rif. Bibliografico                           | Tipo di terreno                                   | $(w/D)_{crit}$ | $\alpha_c$                               |
|--|--|---|----------------|--|
| Back-analysis di prove in vera grandezza             | Bustamente e Gianceselli [1982]              | Sabbia e ghiaia da sciolta a molto densa          | 5%<br>10%      | 0.15<br>0.25                             |
|  | Jamiolkowski e Lancellotta [1988]            |   | 5%             | 0.2                                      |
|  | Franke [1989]                                |   | 5%<br>10%      | 0.16<br>0.21                             |
|  | Frank [1994]                                 | Sabbia da sciolta a molto densa                   | 5%             | 0.15                                     |
| Prove di carico su piastra in camera di calibrazione | Ghionna et al. [1994]                        | Sabbia Ticino<br>$30\% \leq D_R \leq 92\%$        | 5%<br>10%      | 0.10<br>0.15                             |
|  | Dati non pubblicati                          | Sabbia carbonatica Quiou da sciolta a molto densa | 5%<br>10%      | 0.13<br>0.18                             |
| Analisi numerica                                     | Lee e Salgado [1999]                         | Sabbia Ticino<br>$30\% \leq D_R \leq 90\%$        | 5%<br>10%      | $0.08^* - 0.12^\S$<br>$0.13^* - 0.20^\S$ |
|  | Sarri [2001]                                 | Sabbia Ticino<br>$50\% \leq D_R \leq 75\%$        | 5%<br>10%      | $0.09^* - 0.14^\S$<br>$0.13^* - 0.21^\S$ |
| Modellazione fisica in centrifuga                    | Fioravante [1994] e Fioravante et al. [1995] | Sabbia Toyoura<br>$48\% \leq D_R \leq 75\%$       | 5%<br>10%      | $0.10^* - 0.14^\S$<br>$0.15^* - 0.19^\S$ |
|  | Colombi [2005]                               | Sabbia FF<br>$43\% \leq D_R \leq 85\%$            | 5%<br>10%      | $0.14^* - 0.29^\S$<br>$0.22^* - 0.36^\S$ |

\* Da risultati di prove a alta densità

§ Da risultati di prove a media e bassa densità

-*Tabella 5.1 – Stima di  $\alpha_c$  al variare del grado di addensamento e di  $(w/D)_{crit}$ : dati di letteratura per pali trivellati.*

Alsamman [1995], reinterpretando le prove dalla banca dati utilizzate da Bustamante e Gianceselli [1982] composta da 71 prove di carico su pali in vera grandezza non strumentati, trivellati in terreni granulari, ha proposto la correlazione tra  $q_c$  e  $q_{b|crit}$  mostrata in Figura 5.2, valida per  $w/D = 10\%$  e per pali con punta infissa per una lunghezza pari ad almeno 2 diametri nello strato granulare. Il valore di  $q_c$  è stimato nell'intervallo  $L - 1.5D \leq z \leq L + 1.5D$ , con D diametro del palo.



-Figura 5.2– Correlazione  $q_c$ - $q_{b|crit}$  per pali trivellati in sabbie e ghiaie [Alsamman 1995].

## 5.2 PROVA PENETROMETRICA STATICA IN CENTRIFUGA

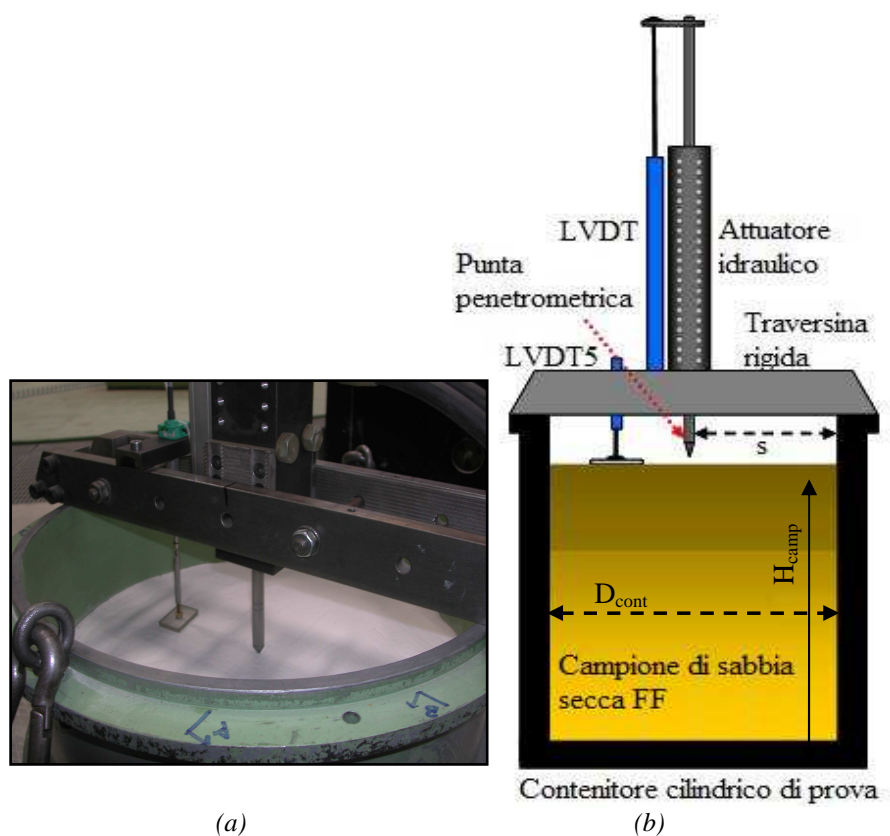
Otto prove penetrometriche statiche, con penetrometro elettrico miniaturizzato (Fig. 5.3a) sono condotte in centrifuga su campioni di sabbia FF secca ricostruiti a due densità relative, una media ( $D_R \approx 50\%$ ) e una alta ( $D_R \approx 70\%$ ), e a valori di accelerazione di 30g, 80g, 130g. Esse hanno permesso di ottenere profili continui con la profondità  $z$ , di  $q_c$ , resistenza alla punta penetrometrica, e  $f_s$ , resistenza per attrito laterale sul manicotto.

Il penetrometro miniaturizzato ha una punta conica di  $60^\circ$  di apertura con diametro  $B=11.3$  mm e un'area di base pari a  $100 \text{ mm}^2$ ; il manicotto laterale su cui è misurata  $f_s$ , ha un'altezza di 36.9 mm con un diametro esterno pari a  $B$ .

La punta è strumentata con una cella di carico miniaturizzata che permette la misura diretta della forza che produce  $q_c$  (fondo scala di 10 kN), mentre la forza che genera  $f_s$  è determinata per differenza tra il valore letto dalla cella di carico posta in testa al manicotto laterale e il valore registrato da quella di base.

I modelli (Tab. 5.2) sono realizzati in uno dei contenitori cilindrici di prova (Fig. 5.3b), avente diametro interno,  $D_{cont}$ , di 400 mm e altezza di circa 490 mm.





-Figura 5.3 – Prova penetrometrica CPT in centrifuga: (a) foto della posizione iniziale della punta penetrometrica; (b) schema della configurazione iniziale di prova.

| Prove CPT in centrifuga su campioni di sabbia secca FF |                    |              |             |                    |                                    |                |                    |
|--|--------------------|--------------|-------------|--------------------|------------------------------------|----------------|--------------------|
| Prova  | $D_{cont}$<br>[mm] | $a/g$<br>[-] | $B$<br>[mm] | $H_{camp}$<br>[mm] | $\gamma_d$<br>[kN/m <sup>3</sup> ] | $D_R^*$<br>[%] | $z_{plmax}$<br>[m] |
| CPT_FF1  | 400                | 30           | 11.3        | 486                | 12.81                              | 44             | 9.3                |
| CPT_FF2  | 400                | 80           | 11.3        | 482                | 13.00                              | 50             | 27.7               |
| CPT_FF3  | 400                | 130          | 11.3        | 482                | 12.99                              | 50             | 45.0               |
| CPT_FF4  | 400                | 30           | 11.3        | 488                | 13.74                              | 72             | 10.6               |
| CPT_FF5  | 400                | 80           | 11.3        | 486                | 13.64                              | 70             | 28.0               |
| CPT_FF6  | 400                | 130          | 11.3        | 484                | 13.68                              | 71             | 45.1               |
| CPT_FF7  | 400                | 30           | 11.3        | 485                | 12.85                              | 45             | 10.5               |
| CPT_FF8  | 400                | 130          | 11.3        | 477                | 12.87                              | 46             | 44.3               |

\*  $\gamma_{min} = 11.59 \text{ kN/m}^3$ ;  $\gamma_{max} = 14.78 \text{ kN/m}^3$

-Tabella 5.2 – Prove penetrometriche in centrifuga su campioni di sabbia secca FF.

Con:

$D_{\text{cont}}$  = diametro interno del contenitore di prova

$a/g$  = livello di accelerazione centrifuga a cui è stata eseguita la prova  
CPT riferito al piano campagna del modello

$B$  = diametro della punta penetrometrica miniaturizzata

$H_{\text{camp}}$  = altezza del campione di sabbia testato

$\gamma_d$  = peso secco per unità di volume della sabbia

$D_R$  = densità relativa del campione testato

$z_{p|\text{max}}$  = profondità massima indagata dalla prova CPT, in scala prototipo

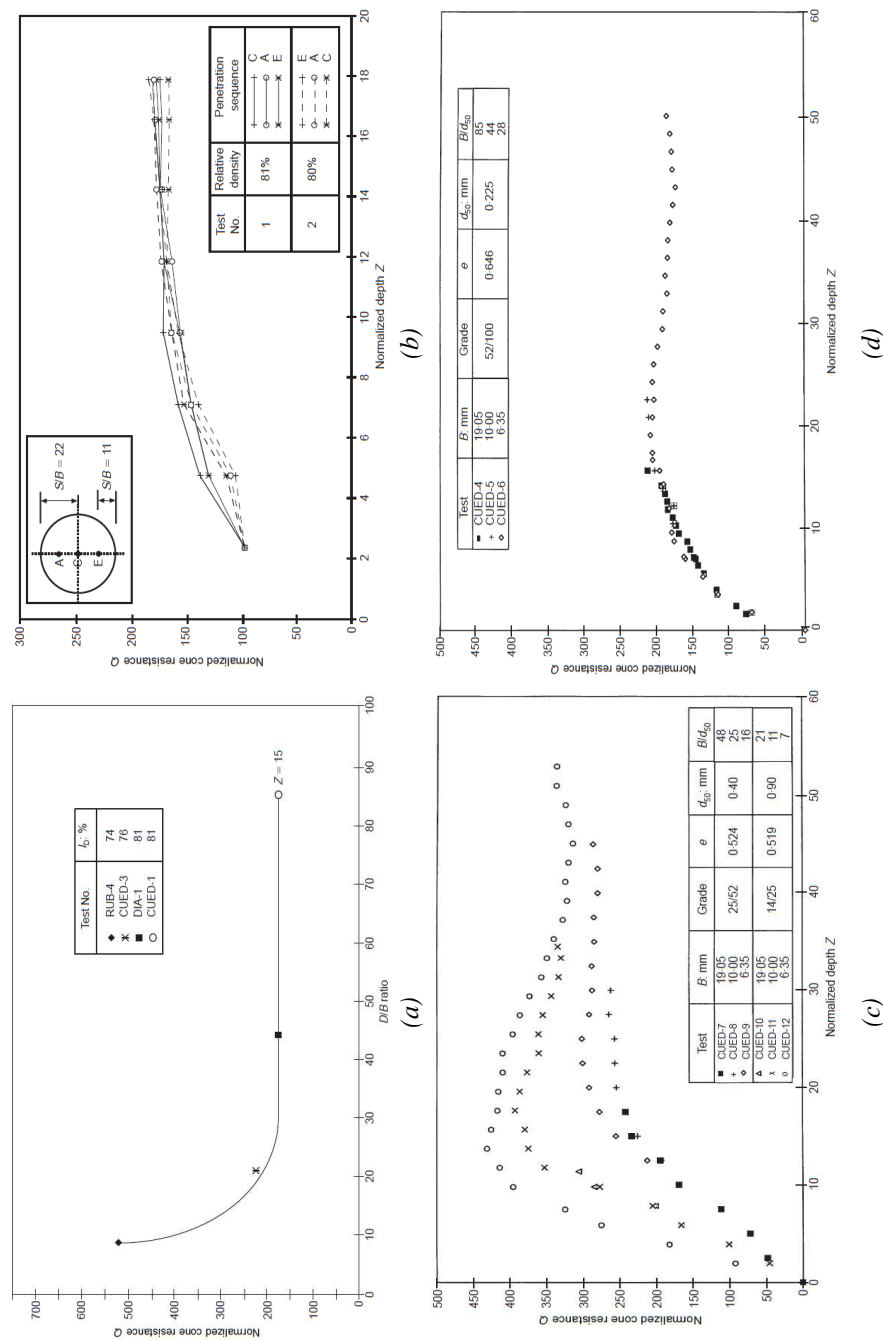
Risultati sperimentali ottenuti dalle misure di  $q_c$  in prove penetrometriche eseguite in centrifuga su campioni di sabbia secca, hanno mostrato che esistono degli effetti scala che interessano il valore di resistenza ottenuto e hanno definito i limiti oltre i quali tali effetti possono essere ritenuti trascurabili [Bolton et al. 1999]:

- $D_{\text{cont}}/B \geq 30$ : effetto della dimensione del contenitore (Fig. 5.4a)  
L'influenza del diametro del contenitore,  $D_{\text{cont}}$ , rispetto a quello della punta CPT,  $B$ , è dovuto alla presenza delle pareti rigide del contenitore che possono indurre un aumento delle tensioni di confinamento del terreno attraversato dal penetrometro. I risultati sperimentali ottenuti dimostrano che le  $q_c$  misurate non risentono di tale effetto se il diametro interno del contenitore è 30 volte maggiore di quello del penetrometro.
- $s/B \geq 10$ : effetto bordo (Fig. 5.4b)  
Dalla sperimentazione condotta non si sono rilevati effetti bordo per i contenitori di prova cilindrici. Per quelli di sezione rettangolare, l'effetto sui valori di  $q_c$  risulta trascurabile se la prova penetrometrica è eseguita a 10-15  $B$  dalla parete laterale.
- $B/D_{50} \geq 20$ : effetto della dimensione dell'inclusione rispetto a quella delle particelle (Figg. 5.4c e 5.4d)  
Il diametro della punta penetrometrica non condiziona la misura della resistenza  $q_c$  se  $B \geq 20D_{50}$ .

Garnier [2002] ha osservato che la velocità di avanzamento della punta penetrometrica, se compresa tra 2 e 20 mm/s, non ha alcun effetto sui valori di  $q_c$  misurati in campioni di sabbia secca.

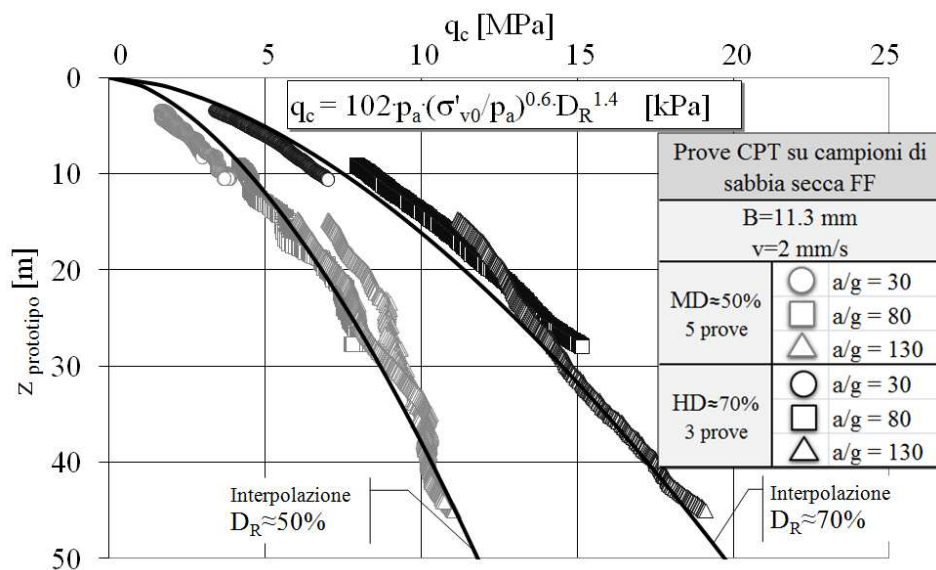
Nelle prove CPT eseguite sui campioni di sabbia secca FF, elencate in Tabella 5.2, gli effetti bordo sono trascurabili in quanto è stato garantito:

- $D_{\text{cont}}/B = 36.4$
- $s/B = 17.7$
- $B/D_{50} = 122$
- $v = 2 \text{ mm/s}$

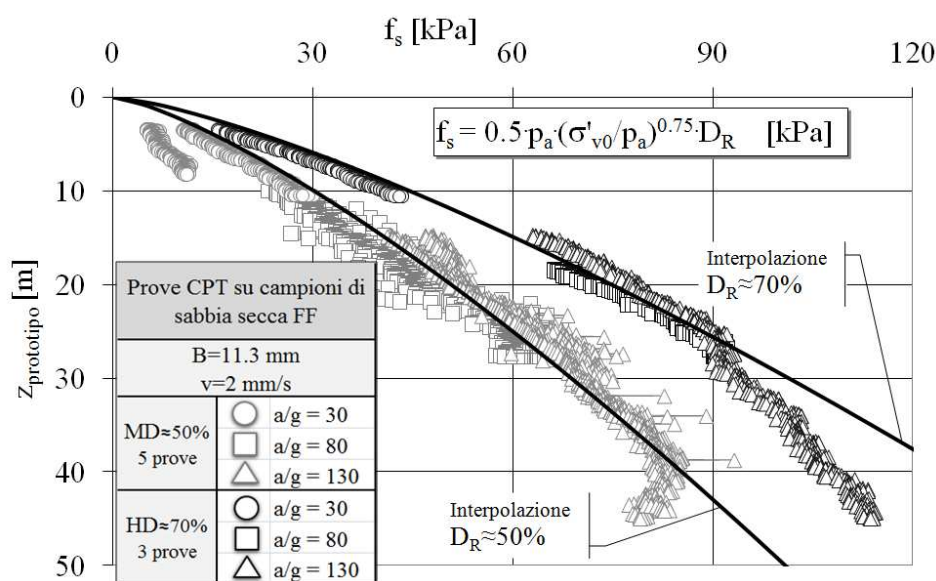


-Figura 5.4 – Effetti scala sulla misura di  $q_c$  da prove CPT in centrifuga [Bolton et al. 1999]: (a) effetto del diametro del contenitore di prove; (b) effetto bordo; (c) e (d) effetto della dimensione delle particelle di sabbia.

I profili di  $q_c$  e di  $f_s$  con la profondità  $z_p$  (in scala prototipo) sono mostrati rispettivamente in Figura 5.5 e Figura 5.6: i tratti iniziali delle curve sono omessi, in quanto i valori di  $q_c$  e  $f_s$ , registrati per  $z < 10B$ , sono affetti da effetti bordo.



-Figura 5.5 – Andamenti  $q_c$ - $z_p$  in campioni di sabbia secca FF a MD e HD e correlazione interpolatrice (5.7).



-Figura 5.6 – Andamenti  $f_s$ - $z_p$  in campioni di sabbia secca FF a MD e HD e correlazione interpolatrice (5.8).

Dalle Figure 5.5 e 5.6 è possibile osservare una buona ripetibilità dei campioni realizzati e una tendenza di  $q_c$  ed  $f_s$  ad aumentare con il grado di addensamento della sabbia.

I risultati delle prove CPT (Figg. 5.5 e 5.6) sono interpretati per determinare i coefficienti di una formulazione analitica che tenga conto della densità relativa  $D_R$  della sabbia e della tensione verticale efficace  $\sigma'_{v0}$ :

$$q_c = 102 \cdot p_a \cdot (\sigma'_{v0}/p_a)^{0.6} \cdot D_R^{1.4} \quad [FL^{-2}] \quad (5.7)$$

$$f_s = 0.5 \cdot p_a \cdot (\sigma'_{v0}/p_a)^{0.75} \cdot D_R \quad [FL^{-2}] \quad (5.8)$$

Con:

$p_a = 101$  kPa, pressione atmosferica

In seguito i valore di  $q_c$  a cui si farà riferimento saranno ricavati dall'equazione (5.7).

### 5.3 PORTATA DI BASE CRITICA

I valori della portata  $q_{b|crit}$ , in corrispondenza di  $w/D=5\%-10\%$ , sono riassunti in Tabella 5.5a, per le prove a MD, e 5.5b per quelle a HD e diagrammati rispetto alla  $q_c$ , calcolata con la (5.7), in Figura 5.7.

I dati sperimentali sono interpolati con la seguente espressione:

$$q_{b|crit} = 0.8 \cdot q_c \cdot (w/D)^{0.5} \quad [FL^{-2}] \quad (5.9)$$

In Tabella 5.3a e 5.3b sono riportati i valori di  $q_{b|crit}$  calcolati dalla (5.9) e i corrispondenti  $q_c$  stimati dalla (5.7).

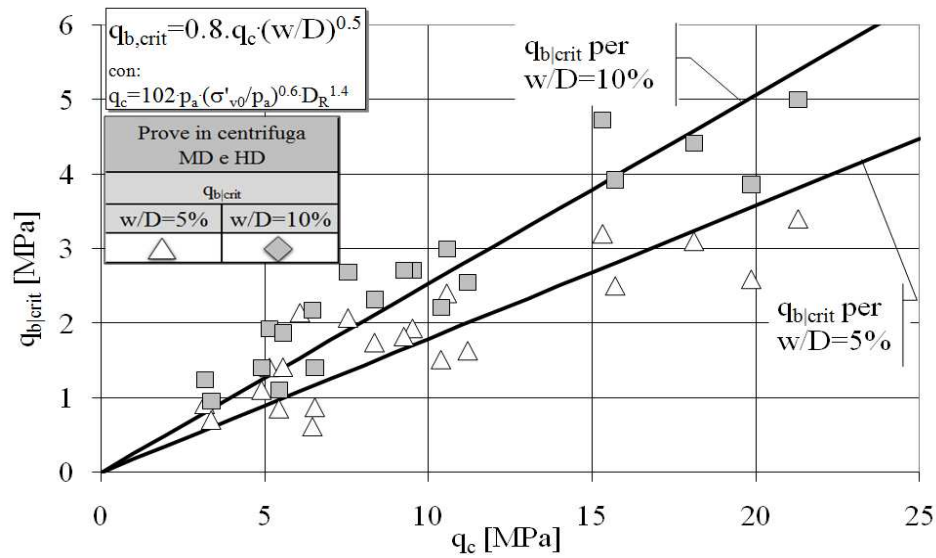
L'equazione (5.9) è impiegata per stimare la  $q_{b|crit}$  dei pali modello caricati in compressione ottenuta in corrispondenza dei due cedimenti normalizzati critici del 5% e del 10%. Le portate unitarie calcolate dall'equazione (5.9), definite  $q_{b|crit|calc}$ , sono confrontate in Figura 5.8 con i dati misurati,  $q_{b|crit|mis}$ , ottenendo una buona corrispondenza, con un errore accettabile in genere compreso tra  $\pm 20\%$ .

| Prove di carico in compressione a Media Densità |         |       |     |       |                  |                   |                  |                   |
|---|---------|-------|-----|-------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| Nome prova                                      | Modello |       |     |       | w/D=5%           |                   | w/D=10%          |                   |
|   | $d_m$   | $D_R$ | a/g | $q_c$ | $q_{b crit mis}$ | $q_{b crit calc}$ | $q_{b crit mis}$ | $q_{b crit calc}$ |
|   | [mm]    | [%]   | [-] | [MPa] | [MPa]            | [MPa]             | [MPa]            | [MPa]             |
| SPC_8_MD_30                                     | 8       | 50.3  | 30  | 3.17  | 0.91             | 0.57              | 1.24             | 0.80              |
| SPC_8_MD_60                                     | 8       | 52.7  | 60  | 5.15  | 1.41             | 0.92              | 1.92             | 1.30              |
| SPC_8_MD_120                                    | 8       | 55.2  | 120 | 8.35  | 1.74             | 1.49              | 2.32             | 2.11              |
| SPC_8_MD_160                                    | 8       | 57.9  | 160 | 10.56 | 2.40             | 1.89              | 2.99             | 2.67              |
| PT3a_FF1  | 10      | 56.2  | 30  | 4.91  | 1.10             | 0.88              | 1.40             | 1.24              |
| PT3a_FF7  | 10      | 43.5  | 30  | 3.37  | 0.70             | 0.60              | 0.95             | 0.85              |
| PT3a_FF8  | 10      | 45.9  | 80  | 6.46  | 0.61             | 1.16              | 2.17             | 1.63              |
| PT3a_FF2  | 10      | 41.7  | 80  | 5.56  | 1.41             | 0.99              | 1.87             | 1.41              |
| PT1_FF28  | 10      | 50.9  | 80  | 7.55  | 2.07             | 1.35              | 2.68             | 1.91              |
| PT3a_FF6  | 10      | 45.8  | 130 | 6.08  | 2.14             | 1.09              | 2.92             | 1.54              |
| SPC_16_MD_30                                    | 16      | 51.9  | 30  | 5.44  | 0.85             | 0.97              | 1.10             | 1.38              |
| SPC_16_MD_80                                    | 16      | 57.4  | 80  | 11.20 | 1.63             | 2.00              | 2.55             | 2.83              |

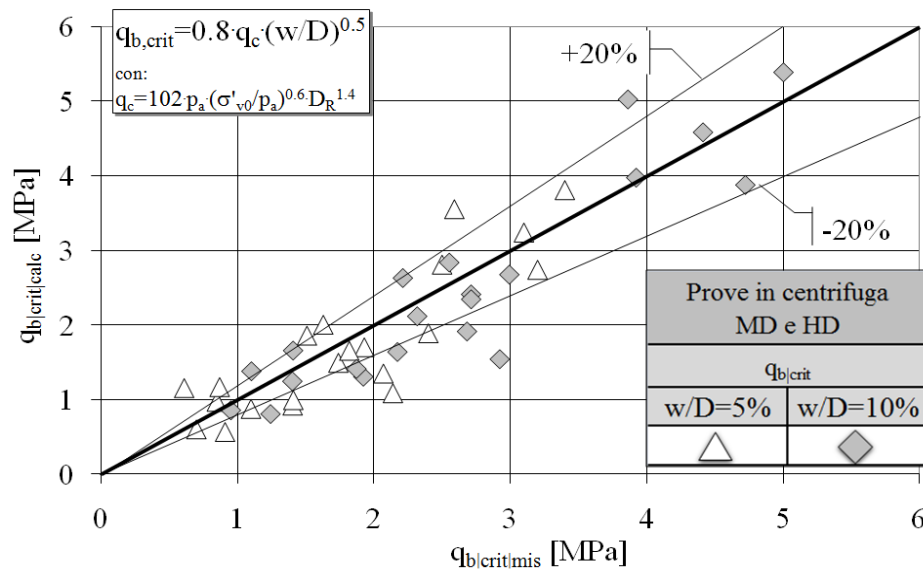
*-Tabella 5.3a – Prove di carico in centrifuga su campioni di sabbia secca FF ricostruiti a MD:  $q_{b|crit|mis}$  e  $q_{b|crit|calc}$  da  $q_c$ .*

| Prove di carico in compressione ad Alta Densità |         |       |     |       |                  |                   |                  |                   |
|---|---------|-------|-----|-------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| Nome prova                                      | Modello |       |     |       | w/D=5%           |                   | w/D=10%          |                   |
|   | $d_m$   | $D_R$ | a/g | $q_c$ | $q_{b crit mis}$ | $q_{b crit calc}$ | $q_{b crit mis}$ | $q_{b crit calc}$ |
|   | [mm]    | [%]   | [-] | [MPa] | [MPa]            | [MPa]             | [MPa]            | [MPa]             |
| SPC_8_HD_30                                     | 8       | 81.5  | 30  | 6.53  | 0.87             | 1.17              | 1.41             | 1.65              |
| SPC_8_HD_60                                     | 8       | 82.5  | 60  | 9.51  | 1.93             | 1.70              | 2.71             | 2.41              |
| SPC_8_HD_120                                    | 8       | 82.8  | 120 | 15.32 | 3.20             | 2.74              | 4.72             | 3.87              |
| SPC_8_HD_160                                    | 8       | 83.2  | 160 | 18.11 | 3.10             | 3.24              | 4.41             | 4.58              |
| PT3a_FF9  | 10      | 85.1  | 30  | 15.70 | 2.50             | 2.81              | 3.92             | 3.97              |
| PT3a_FF3  | 10      | 82.3  | 80  | 21.29 | 3.40             | 3.81              | 5.00             | 5.39              |
| PT3a_FF5  | 10      | 83.7  | 130 | 9.25  | 1.82             | 1.65              | 2.71             | 2.34              |
| SPC_16_HD_30                                    | 16      | 80.3  | 30  | 10.38 | 1.51             | 1.86              | 2.21             | 2.63              |
| SPC_16_HD_80                                    | 16      | 83.2  | 80  | 19.85 | 2.59             | 3.55              | 3.86             | 5.02              |

*-Tabella 5.3b – Prove di carico in centrifuga su campioni di sabbia secca FF ricostruiti a HD:  $q_{b|crit|mis}$  e  $q_{b|crit|calc}$  da  $q_c$ .*



-Figura 5.7– Prove di carico in centrifuga su pali modello trivellati in sabbia a MD e HD: correlazione tra  $q_{b,crit}$  e  $q_c$  al variare di  $w/d$ .



-Figura 5.8– Confronto tra  $q_{b,crit,calc}$  dalla (5.9) e  $q_{b,crit,mis}$  in corrispondenza di  $w/D$  pari a 5% e 10%: prove di carico in centrifuga a MD e HD.

I dati della  $q_{b,crit}$  valutati in corrispondenza di  $w/D=5\%$  e  $w/D=10\%$  dalle prove in centrifuga sono normalizzati rispetto a  $\sigma'_{v0}$ , per determinare un fattore di capacità portante “critico”:

$$N_{crit} = q_{b,crit}/\sigma'_{v0} \quad [FL^{-2}] \quad (5.10)$$

I valori calcolati, riportati in Tabella 5.4a, per le prove su campioni a MD, e 5.4b, per quelle a HD, sono diagrammati in Figura 5.9 in funzione della tensione efficace verticale iniziale  $\sigma'_{v0}$ , distinguendoli per media e alta densità.

| Prove di carico in compressione a Media Densità |         |       |     |                |                   |            |                   |            |
|---|---------|-------|-----|----------------|-------------------|------------|-------------------|------------|
| Nome prova                                      | Modello |       |     |                | w/D=5%            |            | w/D=10%           |            |
|   | $d_m$   | $D_R$ | a/g | $\sigma'_{v0}$ | $q_{b,crit,imis}$ | $N_{crit}$ | $q_{b,crit,imis}$ | $N_{crit}$ |
|   | [mm]    | [%]   | [-] | [kPa]          | [MPa]             | [-]        | [MPa]             | [-]        |
| SPC_8_MD_30                                     | 8       | 50.3  | 30  | 70             | 0.91              | 12.9       | 1.24              | 17.6       |
| SPC_8_MD_60                                     | 8       | 52.7  | 60  | 142            | 1.41              | 9.9        | 1.92              | 13.6       |
| SPC_8_MD_120                                    | 8       | 55.2  | 120 | 285            | 1.74              | 6.1        | 2.32              | 8.1        |
| SPC_8_MD_160                                    | 8       | 57.9  | 160 | 377            | 2.40              | 6.4        | 2.99              | 7.9        |
| PT3a_FF1  | 10      | 56.2  | 30  | 113            | 1.10              | 9.8        | 1.40              | 12.4       |
| PT3a_FF7  | 10      | 43.5  | 30  | 109            | 0.70              | 8.3        | 0.95              | 8.7        |
| PT3a_FF8  | 10      | 45.9  | 80  | 286            | 0.61              | 6.4        | 2.17              | 7.6        |
| PT3a_FF2  | 10      | 41.7  | 80  | 278            | 1.41              | 5.1        | 1.87              | 6.7        |
| PT1_FF28  | 10      | 50.9  | 80  | 291            | 2.07              | 7.1        | 2.68              | 9.2        |
| PT3a_FF6  | 10      | 45.8  | 130 | 259            | 2.14              | 8.3        | 2.92              | 11.3       |
| SPC_16_MD_30                                    | 16      | 51.9  | 30  | 161            | 0.85              | 5.3        | 1.10              | 6.8        |
| SPC_16_MD_80                                    | 16      | 57.4  | 80  | 424            | 1.63              | 3.8        | 2.55              | 6.0        |

-Tabella 5.4a – Prove di carico in centrifuga su campioni di sabbia secca FF ricostruiti a MD:  $N_{crit}$ .

| Prove di carico in compressione ad Alta Densità |         |       |     |                |                   |            |                   |            |
|---|---------|-------|-----|----------------|-------------------|------------|-------------------|------------|
| Nome prova                                      | Modello |       |     |                | w/D=5%            |            | w/D=10%           |            |
|   | $d_m$   | $D_R$ | a/g | $\sigma'_{v0}$ | $q_{b,crit,imis}$ | $N_{crit}$ | $q_{b,crit,imis}$ | $N_{crit}$ |
|   | [mm]    | [%]   | [-] | [kPa]          | [MPa]             | [-]        | [MPa]             | [-]        |
| SPC_8_HD_30                                     | 8       | 81.5  | 30  | 76             | 0.87              | 11.4       | 1.41              | 18.5       |
| SPC_8_HD_60                                     | 8       | 82.5  | 60  | 139            | 1.93              | 13.9       | 2.71              | 19.6       |
| SPC_8_HD_120                                    | 8       | 82.8  | 120 | 304            | 3.20              | 10.5       | 4.72              | 15.5       |
| SPC_8_HD_160                                    | 8       | 83.2  | 160 | 397            | 3.10              | 7.8        | 4.41              | 11.1       |
| PT3a_FF9  | 10      | 85.1  | 30  | 321            | 2.50              | 7.8        | 3.92              | 12.2       |
| PT3a_FF3  | 10      | 82.3  | 80  | 513            | 3.40              | 6.6        | 5.00              | 9.8        |
| PT3a_FF5  | 10      | 83.7  | 130 | 123            | 1.82              | 14.8       | 2.71              | 22.0       |
| SPC_16_HD_30                                    | 16      | 80.3  | 30  | 171            | 1.51              | 8.9        | 2.21              | 13.0       |
| SPC_16_HD_80                                    | 16      | 83.2  | 80  | 463            | 2.59              | 5.6        | 3.86              | 8.3        |

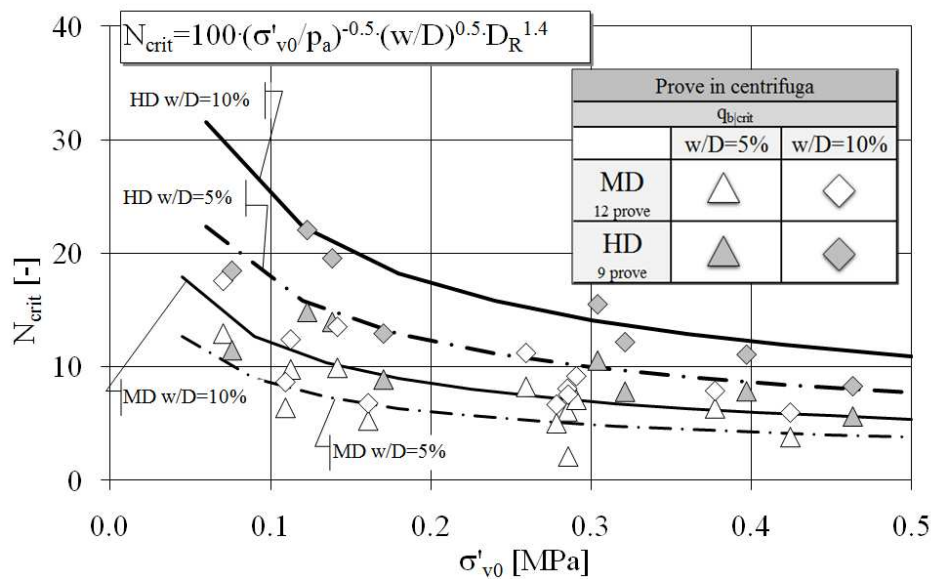
-Tabella 5.4b – Prove di carico in centrifuga su campioni di sabbia secca FF ricostruiti a HD:  $N_{crit}$ .



I punti sperimentali (Tabb. 5.4a e 5.4b) sono interpolati dalla relazione:

$$N_{crit} = 100 \cdot (\sigma'_{v0}/p_a)^{-0.5} \cdot (w/D)^{0.5} \cdot (D_R)^{1.4} \quad [-] \quad (5.11)$$

Per valutare l'errore commesso dall'equazione interpolatrice (5.11), i valori di  $q_{b|crit}$  calcolati dalla (5.10), riportati nella Tabella 5.5a, per i campioni a MD, e Tabella 5.5b, per quelli a HD, sono messi a confronto con le portate di base critiche stimate dalle prove in centrifuga,  $q_{b|crit|mis}$ , in corrispondenza di un cedimento relativo di  $w/D=5\%$  e  $w/D=10\%$ . Il confronto, riportato in Figura 5.10, mostra una dispersione di  $\pm 20\%$ , con una generale tendenza a sovrastimare i valori delle prove condotte in campioni a HD e a sottostimare quelli riferiti a campioni a MD.



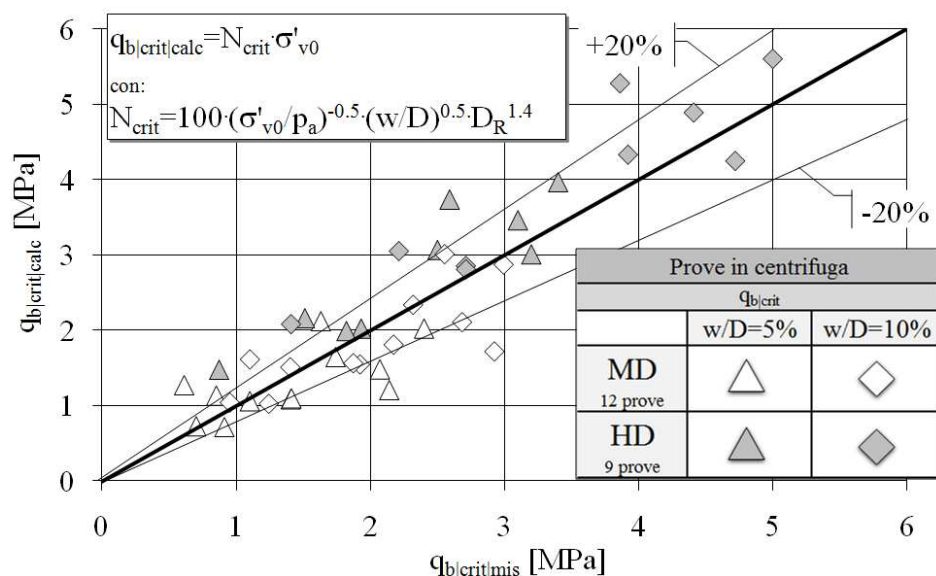
-Figura 5.9 – Prove di carico in centrifuga su pali modello trivellati in sabbia a MD e HD: correlazione tra  $N_{crit}$  e  $\sigma'_{v0}$  al variare di  $w/D$ .

| Prove di carico in compressione a Media Densità |         |       |       |                |                  |                   |                  |                   |
|---|---------|-------|-------|----------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| Nome prova                                      | Modello |       |       |                | w/D=5%           |                   | w/D=10%          |                   |
|   | $d_m$   | $D_R$ | $a/g$ | $\sigma'_{v0}$ | $q_{b/crit/mis}$ | $q_{b/crit/calc}$ | $q_{b/crit/mis}$ | $q_{b/crit/calc}$ |
|   | [mm]    | [%]   | [-]   | [kPa]          | [MPa]            | [MPa]             | [MPa]            | [MPa]             |
| SPC_8_MD_30                                     | 8       | 50.3  | 30    | 70             | 0.91             | 0.72              | 1.24             | 1.02              |
| SPC_8_MD_60                                     | 8       | 52.7  | 60    | 142            | 1.41             | 1.09              | 1.92             | 1.54              |
| SPC_8_MD_120                                    | 8       | 55.2  | 120   | 285            | 1.74             | 1.65              | 2.32             | 2.33              |
| SPC_8_MD_160                                    | 8       | 57.9  | 160   | 377            | 2.40             | 2.03              | 2.99             | 2.87              |
| PT3a_FF1  | 10      | 56.2  | 30    | 113            | 1.10             | 1.06              | 1.40             | 1.50              |
| PT3a_FF7  | 10      | 43.5  | 30    | 109            | 0.70             | 0.73              | 0.95             | 1.04              |
| PT3a_FF8  | 10      | 45.9  | 80    | 286            | 0.61             | 1.28              | 2.17             | 1.81              |
| PT3a_FF2  | 10      | 41.7  | 80    | 278            | 1.41             | 1.10              | 1.87             | 1.56              |
| PT1_FF28  | 10      | 50.9  | 80    | 291            | 2.07             | 1.49              | 2.68             | 2.10              |
| PT3a_FF6  | 10      | 45.8  | 130   | 259            | 2.14             | 1.21              | 2.92             | 1.71              |
| SPC_16_MD_30                                    | 16      | 51.9  | 30    | 161            | 0.85             | 1.14              | 1.10             | 1.61              |
| SPC_16_MD_80                                    | 16      | 57.4  | 80    | 424            | 1.63             | 2.13              | 2.55             | 3.01              |

*-Tabella 5.5a – Prove di carico in centrifuga su campioni di sabbia secca FF ricostruiti a MD:  $q_{b/crit/mis}$  e  $q_{b/crit/calc}$  da  $N_{crit}$*

| Prove di carico in compressione ad Alta Densità |         |       |       |                |                  |                   |                  |                   |
|---|---------|-------|-------|----------------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| Nome prova                                      | Modello |       |       |                | w/D=5%           |                   | w/D=10%          |                   |
|   | $d_m$   | $D_R$ | $a/g$ | $\sigma'_{v0}$ | $q_{b/crit/mis}$ | $q_{b/crit/calc}$ | $q_{b/crit/mis}$ | $q_{b/crit/calc}$ |
|   | [mm]    | [%]   | [-]   | [kPa]          | [MPa]            | [MPa]             | [MPa]            | [MPa]             |
| SPC_8_HD_30                                     | 8       | 81.5  | 30    | 76             | 0.87             | 1.47              | 1.41             | 2.08              |
| SPC_8_HD_60                                     | 8       | 82.5  | 60    | 139            | 1.93             | 2.02              | 2.71             | 2.86              |
| SPC_8_HD_120                                    | 8       | 82.8  | 120   | 304            | 3.20             | 3.01              | 4.72             | 4.25              |
| SPC_8_HD_160                                    | 8       | 83.2  | 160   | 397            | 3.10             | 3.46              | 4.41             | 4.90              |
| PT3a_FF9  | 10      | 85.1  | 30    | 321            | 2.50             | 3.07              | 3.92             | 4.34              |
| PT3a_FF3  | 10      | 82.3  | 80    | 513            | 3.40             | 3.97              | 5.00             | 5.61              |
| PT3a_FF5  | 10      | 83.7  | 130   | 123            | 1.82             | 1.99              | 2.71             | 2.81              |
| SPC_16_HD_30                                    | 16      | 80.3  | 30    | 171            | 1.51             | 2.16              | 2.21             | 3.05              |
| SPC_16_HD_80                                    | 16      | 83.2  | 80    | 463            | 2.59             | 3.74              | 3.86             | 5.29              |

*-Tabella 5.5b – Prove di carico in centrifuga su campioni di sabbia secca FF ricostruiti a HD:  $q_{b/crit/mis}$  e  $q_{b/crit/calc}$  da  $N_{crit}$*



-Figura 5.10- Confronto tra  $q_{b/crit/calc}$ , calcolata dalla (5.10) e (5.11), e  $q_{b/crit/mis}$ , in corrispondenza di  $w/D$  del 5% e 10%; prove di carico in centrifuga a MD e HD.

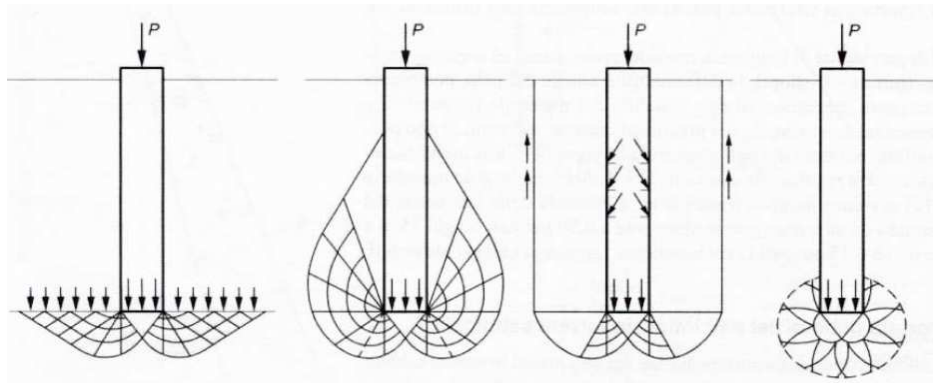
## 5.4 PORTATA DI BASE ULTIMA

Il valore della portata di base ultima di un palo trivellato in sabbia è analogo a quello raggiunto nelle medesime condizioni al contorno da un palo infisso. La mobilitazione è però differente: il palo trivellato aumenta progressivamente con lo spostamento la sua  $Q_b$  e solo per  $w/D \geq 100\%$  raggiunge il limite di  $Q_{bu}$ .

Il valore di  $Q_{bu}$  dipende dal meccanismo di rottura attorno alla punta, che non è determinabile a priori. In Figura 5.11 sono riassunti alcuni dei possibili meccanismi di rottura, ipotizzati da differenti autori.

Per studiare come la portata di base ultima per i pali trivellati si modifica in funzione della densità relativa della sabbia e della tensione verticale efficace iniziale agente in prossimità della punta, si sono elaborati i risultati delle prove di carico condotte in centrifuga su pali modello.

Per ciascuna prova di carico, il valore della portata di base unitaria ultima,  $q_{bu}$ , è assunto in corrispondenza di un cedimento  $w/D=100\%$ , e normalizzato rispetto alla  $q_c$ , calcolata dalla equazione (5.7). I rapporti ottenuti sono riassunti in Tabella 5.6a, per le prove a MD, e in Tabella 5.6b, per quelle a HD, e rappresentati graficamente in Figura 5.14 al variare della tensione efficace verticale iniziale  $\sigma'_{v0}$ .



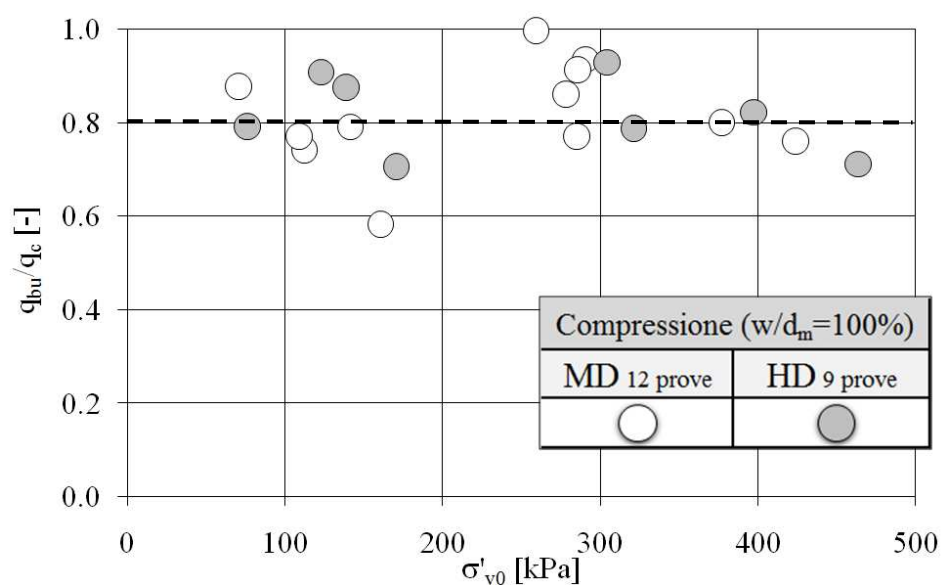
-Figura 5.11 – Meccanismi di rottura attorno alla base del palo trivellato o infisso [da Lancellotta e Calavera 1999].

| Prove di carico in compressione a Media Densità |               |              |              |                         |                   |                |                     |
|---|---------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------|----------------|---------------------|
| Nome prova                                      | Modello       |              |              |                         | w/D=100%          |                |                     |
|   | $d_m$<br>[mm] | $D_R$<br>[%] | $a/g$<br>[-] | $\sigma'_{v0}$<br>[kPa] | $q_{bu}$<br>[MPa] | $q_c$<br>[MPa] | $q_{bu}/q_c$<br>[-] |
| SPC_8_MD_30                                     | 8             | 50.3         | 30           | 70                      | 2.65              | 3.17           | 0.88                |
| SPC_8_MD_60                                     | 8             | 52.7         | 60           | 142                     | 3.92              | 5.15           | 0.79                |
| SPC_8_MD_120                                    | 8             | 55.2         | 120          | 285                     | 6.18              | 8.35           | 0.77                |
| SPC_8_MD_160                                    | 8             | 57.9         | 160          | 377                     | 8.15              | 10.56          | 0.80                |
| PT3a_FF1  | 10            | 56.2         | 30           | 113                     | 3.45              | 4.91           | 0.74                |
| PT3a_FF7  | 10            | 43.5         | 30           | 109                     | 2.46              | 3.37           | 0.77                |
| PT3a_FF8  | 10            | 45.9         | 80           | 286                     | 5.60              | 6.46           | 0.91                |
| PT3a_FF2  | 10            | 41.7         | 80           | 278                     | 4.56              | 5.56           | 0.86                |
| PT1_FF28  | 10            | 50.9         | 80           | 291                     | 6.75              | 7.55           | 0.93                |
| PT3a_FF6  | 10            | 45.8         | 130          | 259                     | 8.11              | 6.08           | 1.00                |
| SPC_16_MD_30                                    | 16            | 51.9         | 30           | 161                     | 2.76              | 5.44           | 0.58                |
| SPC_16_MD_80                                    | 16            | 57.4         | 80           | 424                     | 7.37              | 11.20          | 0.76                |

-Tabella 5.6a – Prove di carico in centrifuga su campioni di sabbia secca FF ricostruiti a MD:  $q_{bu}/q_c$ .

| Prove di carico in compressione ad Alta Densità |               |              |              |                         |                   |                |                     |
|---|---------------|--------------|--------------|-------------------------|-------------------|----------------|---------------------|
| Nome prova                                      | Modello       |              |              |                         | w/D=100%          |                |                     |
|   | $d_m$<br>[mm] | $D_R$<br>[%] | $a/g$<br>[-] | $\sigma'_{v0}$<br>[kPa] | $q_{bu}$<br>[MPa] | $q_c$<br>[MPa] | $q_{bu}/q_c$<br>[-] |
| SPC_8_HD_30                                     | 8             | 81.5         | 30           | 76                      | 5.04              | 6.53           | 0.79                |
| SPC_8_HD_60                                     | 8             | 82.5         | 60           | 139                     | 8.42              | 9.51           | 0.88                |
| SPC_8_HD_120                                    | 8             | 82.8         | 120          | 304                     | 13.77             | 15.32          | 0.93                |
| SPC_8_HD_160                                    | 8             | 83.2         | 160          | 397                     | 14.45             | 18.11          | 0.82                |
| PT3a_FF9  | 10            | 85.1         | 30           | 321                     | 11.70             | 15.70          | 0.79                |
| PT3a_FF3  | 10            | 82.3         | 80           | 513                     | 17.10             | 21.29          | 0.84                |
| PT3a_FF5  | 10            | 83.7         | 130          | 123                     | 8.00              | 9.25           | 0.91                |
| SPC_16_HD_30                                    | 16            | 80.3         | 30           | 171                     | 6.43              | 10.38          | 0.71                |
| SPC_16_HD_80                                    | 16            | 83.2         | 80           | 463                     | 12.67             | 19.85          | 0.71                |

-Tabella 5.6b – Prove di carico in centrifuga su campioni di sabbia secca FF ricostruiti a HD:  $q_{bu}/q_c$ .



-Figura 5.12 – Rapporti  $q_{bu}/q_c$  al variare della  $\sigma'_{v0}$  calcolata alla base dei pali modello testati con prove di carico in centrifuga: MD e HD.

Dai risultati delle prove di carico in centrifuga (Fig. 5.12), è possibile stimare la portata di base unitaria ultima, raggiunta per cedimenti dei pali modello di  $w/D=100\%$ , per entrambi i livelli di addensamento, come:

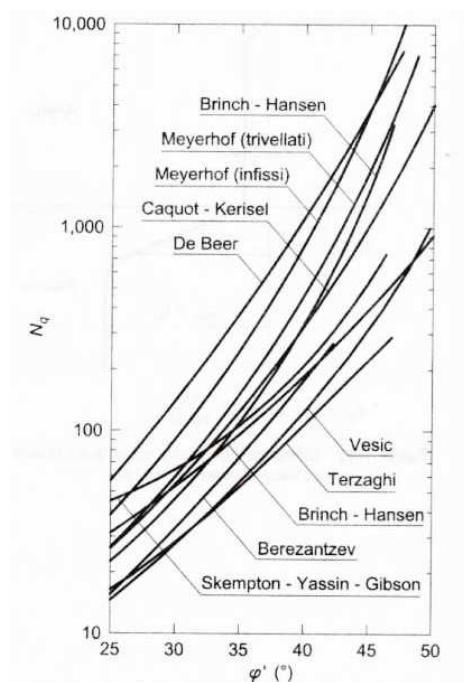
$$q_{bu}=0.8q_c \quad [FL^{-2}] \quad (5.12)$$

In letteratura, la stima di  $q_{bu}$  è frequentemente eseguita in funzione della tensione efficace verticale iniziale  $\sigma'_{v0}$ , impiegando il fattore di capacità portante  $N_q$ , secondo la correlazione:

$$q_{bu} = N_q \cdot \sigma'_{v0} \quad [FL^{-2}] \quad (5.13)$$

Il valore del coefficiente  $N_q$  dipende dall'angolo di resistenza al taglio di picco  $\phi'_p$ , valutato in un intorno della punta nelle condizioni di rottura. Esso è inoltre dipendente del meccanismo di rottura ipotizzato al di sotto della base del palo (Fig.5.11). Come è possibile osservare in Figura 5.13, che riassume le principali correlazioni reperibili in letteratura per la determinazione del fattore di capacità portante,  $N_q$  è fortemente variabile e la sua stima incerta porta a ottenere portate di base ultime anche molto differenti fra loro, a parità di  $\phi'$ , in dipendenza dall'autore di cui si sceglie la correlazione.

Dai risultati delle prove di carico in centrifuga si sono calcolati i valori di  $N_q$ , ottenuti dalle  $q_{bu}$  riassunte nelle Tabelle 5.6a e 5.6b riferite a  $w/D=100\%$ ; tali valori sono diagrammati in Figura 5.14 in funzione della  $D_R$  di ciascun campione e riportati in Tabella 5.7a, per le prove di carico a MD, e in Tabella 5.7b, per quelle a HD.



-Figura 5.13– Coefficiente di capacità portante  $N_q$  corrispondente ai meccanismi di rottura mostrati in Figura 5.11.

| Prove di carico in compressione a Media Densità |                        |                       |            |                           |                          |                       |
|---|------------------------|-----------------------|------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Nome prova                                      | Modello                |                       |            |                           | w/D=100%                 |                       |
|   | d <sub>m</sub><br>[mm] | D <sub>R</sub><br>[%] | a/g<br>[-] | σ' <sub>v0</sub><br>[kPa] | q <sub>bu</sub><br>[MPa] | N <sub>q</sub><br>[-] |
| SPC_8_MD_30                                     | 8                      | 50.3                  | 30         | 70                        | 2.65                     | 38                    |
| SPC_8_MD_60                                     | 8                      | 52.7                  | 60         | 142                       | 3.92                     | 28                    |
| SPC_8_MD_120                                    | 8                      | 55.2                  | 120        | 285                       | 6.18                     | 22                    |
| SPC_8_MD_160                                    | 8                      | 57.9                  | 160        | 377                       | 8.15                     | 22                    |
| PT3a_FF1  | 10                     | 56.2                  | 30         | 113                       | 3.45                     | 31                    |
| PT3a_FF7  | 10                     | 43.5                  | 30         | 109                       | 2.46                     | 23                    |
| PT3a_FF8  | 10                     | 45.9                  | 80         | 286                       | 5.60                     | 20                    |
| PT3a_FF2  | 10                     | 41.7                  | 80         | 278                       | 4.56                     | 16                    |
| PT1_FF28  | 10                     | 50.9                  | 80         | 291                       | 6.75                     | 23                    |
| PT3a_FF6  | 10                     | 45.8                  | 130        | 259                       | 8.11                     | 31                    |
| SPC_16_MD_30                                    | 16                     | 51.9                  | 30         | 161                       | 2.76                     | 17                    |
| SPC_16_MD_80                                    | 16                     | 57.4                  | 80         | 424                       | 7.37                     | 17                    |

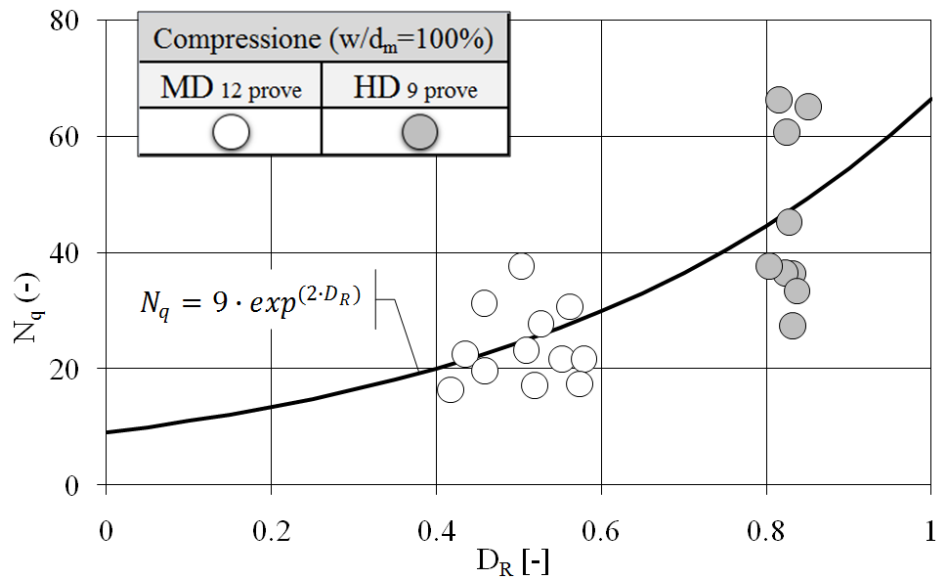
*-Tabella 5.7a – Prove di carico in centrifuga su campioni di sabbia secca FF ricostruiti a MD: coefficiente di capacità portante N<sub>q</sub>.*

| Prove di carico in compressione ad Alta Densità |                        |                       |            |                           |                          |                       |
|---|------------------------|-----------------------|------------|---------------------------|--------------------------|-----------------------|
| Nome prova                                      | Modello                |                       |            |                           | w/D=100%                 |                       |
|   | d <sub>m</sub><br>[mm] | D <sub>R</sub><br>[%] | a/g<br>[-] | σ' <sub>v0</sub><br>[kPa] | q <sub>bu</sub><br>[MPa] | N <sub>q</sub><br>[-] |
| SPC_8_HD_30                                     | 8                      | 81.5                  | 30         | 76                        | 5.04                     | 66                    |
| SPC_8_HD_60                                     | 8                      | 82.5                  | 60         | 139                       | 8.42                     | 61                    |
| SPC_8_HD_120                                    | 8                      | 82.8                  | 120        | 304                       | 13.77                    | 45                    |
| SPC_8_HD_160                                    | 8                      | 83.2                  | 160        | 397                       | 14.45                    | 36                    |
| PT3a_FF9  | 10                     | 85.1                  | 30         | 321                       | 11.70                    | 36                    |
| PT3a_FF3  | 10                     | 82.3                  | 80         | 513                       | 17.10                    | 33                    |
| PT3a_FF5  | 10                     | 83.7                  | 130        | 123                       | 8.00                     | 65                    |
| SPC_16_HD_30                                    | 16                     | 80.3                  | 30         | 171                       | 6.43                     | 38                    |
| SPC_16_HD_80                                    | 16                     | 83.2                  | 80         | 463                       | 12.67                    | 27                    |

*-Tabella 5.7b – Prove di carico in centrifuga su campioni di sabbia secca FF ricostruiti a HD: coefficiente di capacità portante N<sub>q</sub>.*

In Figura 5.14 i dati sperimentali sono interpolati con una equazione esponenziale che permette di definire il valore del coefficiente di capacità portante al variare della D<sub>R</sub>:

$$N_q = 9 \cdot \exp^{(2 \cdot D_R)} \quad [-] \quad (5.14)$$



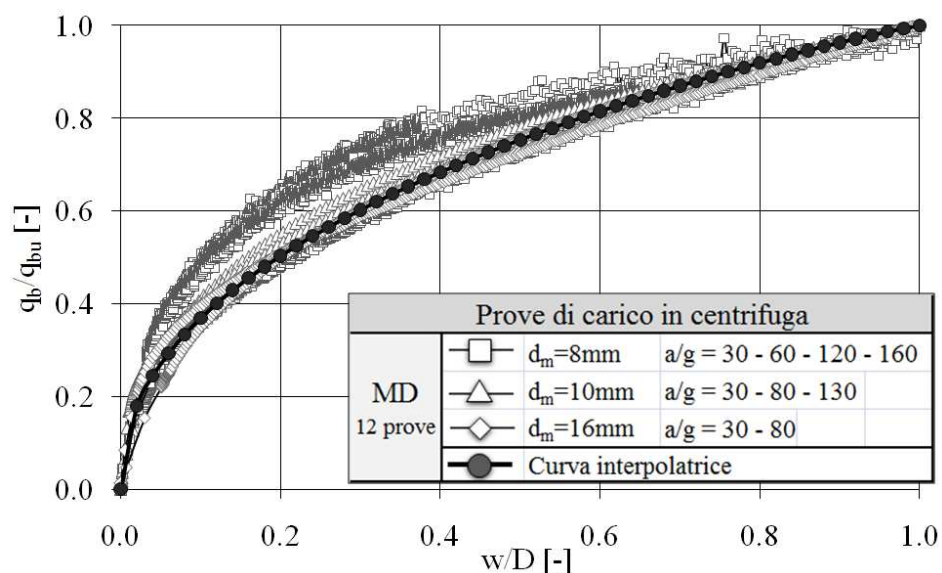
-Figura 5.14– Prove di carico in centrifuga su pali modello trivellati in sabbia a MD e HD: coefficiente  $N_q$  stimato per  $w/D=100\%$ .

La dipendenza di  $N_q$  dal grado di addensamento dei depositi sabbiosi può giustificare in parte la grande variabilità rilevata tra le correlazioni presenti in letteratura (Fig. 5.13).

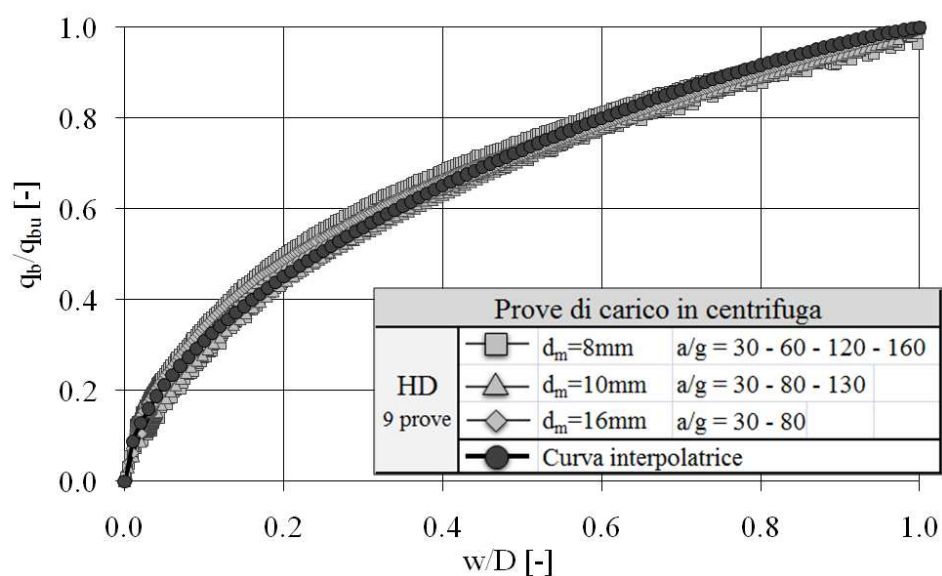
### 5.5 CURVE DI MOBILITAZIONE DELLA PORTATA DI BASE UNITARIA

Le portate di base unitarie  $q_b$ , ottenute dalle prove in centrifuga e corrette della portata residua, sono normalizzate rispetto al loro valore limite  $q_{bu}$  valutato per un cedimento relativo  $w/D=100\%$  e diagrammati in funzione di  $w/D$  in Figura 5.15, per i modelli con sabbia a MD, e in Figura 5.16, per quelli con sabbia ricostruita a HD.





-Figura 5.15 – Curve di mobilitazione delle portate di base unitarie, corrette di  $q_{b0}$ , per pali modello trivellati in sabbia FF secca deposta a media densità (MD); curva interpolatrice a MD.



-Figura 5.16 – Curve di mobilitazione delle portate di base unitarie, corrette di  $q_{b0}$ , per pali modello trivellati in sabbia FF secca deposta ad alta densità (HD); curva interpolatrice a HD.

Dagli andamenti mostrati nelle Figure 5.15 e 5.16 è possibile individuare una curva di inviluppo, la cui espressione analitica generale,

formalmente analoga a quella ricavata per le curve di mobilitazione delle tensioni tangenziali, è:

$$\frac{q_b}{q_{bu}} = \left[ 1 - \left( 1 - \frac{w}{D} \right)^a \right]^{\frac{1}{b}} \quad [-] \quad (5.15)$$

Per le prove a MD:

$$a = 1.1$$

$$b = 2.2$$

Per le prove a HD:

$$a = 1.2$$

$$b = 1.8$$

Dai risultati ottenuti per un palo idealmente trivellato in sabbia secca FF, si riscontra che la curva di mobilitazione della portata di base unitaria, corretta rispetto alla portata unitaria residua  $q_{b0}$ , è dipendente dalla densità relativa, dipendenza espressa dalla variazione dei parametri  $a$  e  $b$  della (5.15).

La conoscenza di relazioni semi-empiriche, come la (5.15), permette di determinare, per un palo trivellato con base in sabbia, il valore della portata di base critica  $q_{b|crit}$  per un qualunque valore  $w/D$ .

## 5.6 SCOMPOSIZIONE DEL CARICO TOTALE

Frequentemente le prove di carico in sito sono condotte su pali non strumentati rendendo impossibile la scomposizione dei due contributi di resistenza laterale e di base.

Analizzando le prove di carico eseguite in centrifuga su pali rugosi trivellati, si sono ottenuti i risultati mostrati in Figura 5.17, per le prove in sabbia a MD, e in Figura 5.18, per quelle in sabbia a HD.

Il carico esterno applicato durante la prova,  $Q_{est}$ , è normalizzato per la portata di base  $Q_b$ , misurata dalla cella posta in punta al palo, e diagrammato rispetto a  $w/D$  (Figg. 5.17 e 5.18).

Dall'equilibrio alla traslazione verticale si ottiene:

$$Q_{est} = Q_b + Q_s \quad [F] \quad (5.16)$$

Da cui:

$$Q_{est}/Q_b = 1 + Q_s/Q_b \quad [-] \quad (5.17)$$

Quindi i grafici in Figura 5.17 e 5.18 mostrano come la forza esterna si ripartisce tra portata laterale  $Q_s$  e di base  $Q_b$  al variare di  $w/D$ .

Le curve ottenute (Figg. 5.17 e 5.18) appaiono decrescenti al progredire del cedimento. Inizialmente per  $w/D < 0.01$ , il carico esterno è equilibrato dal palo principalmente per attrito laterale; successivamente inizia a svilupparsi la portata di base e progressivamente  $Q_{est}$  è ripartito tra le due componenti di resistenza. Per grandi spostamenti,  $w/D \geq 0.6$ , il rapporto tra  $Q_b$  e  $Q_s$  si mantiene costante e dipendente dal livello iniziale di  $D_R$  del deposito di sabbia.

Le curve ottenute dalla campagna sperimentale di prove di carico in centrifuga su pali rugosi trivellati in sabbia, sono interpolate da una funzione analitica, come mostrato in Figura 5.17 (MD -  $D_R \approx 50\%$ ) e in Figura 5.18 (HD -  $D_R \approx 80\%$ ):

$$Q_{est}/Q_b = [2.13 - 0.66D_R] \cdot (w/d)^{-0.3} \quad [-] \quad (5.18)$$

La curva interpolatrice è funzione della  $D_R$  che definisce il rapporto tra  $Q_s$  e  $Q_b$ .

Per pali trivellati in sabbia a MD si è osservato che per grandi cedimenti la portata laterale è circa 80% di quella di base:

$$w/D \geq 0.6 \quad Q_{est}/Q_b \approx 1.8 \quad Q_s/Q_b \approx 0.8$$

Per pali trivellati in sabbia a HD, è stato invece osservato che per grandi cedimenti la portata laterale è pari a circa il 60% di  $Q_b$ :

$$w/D \geq 0.6 \quad Q_{est}/Q_b \approx 1.6 \quad Q_s/Q_b \approx 0.6$$

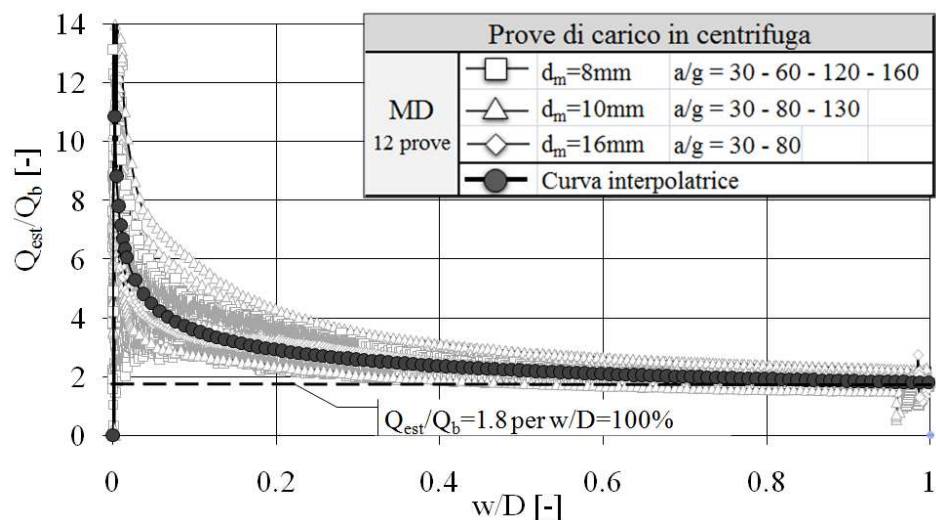
La portata laterale può essere espressa come prodotto della tensione media  $\tau_s$ , agente sulla superficie del fusto per un generico  $w/D$ , e l'area laterale  $A_s$ . La tensione tangenziale è esplicitabile attraverso l'utilizzo della curva di mobilitazione dell'attrito laterale definita dall'equazione (2.19). Si ottiene pertanto:

$$Q_s = \tau_s A_s = \tau_{su} [1 - (1 - w/w_{su})^2]^{1/b} \pi D L \quad [F] \quad (5.19)$$

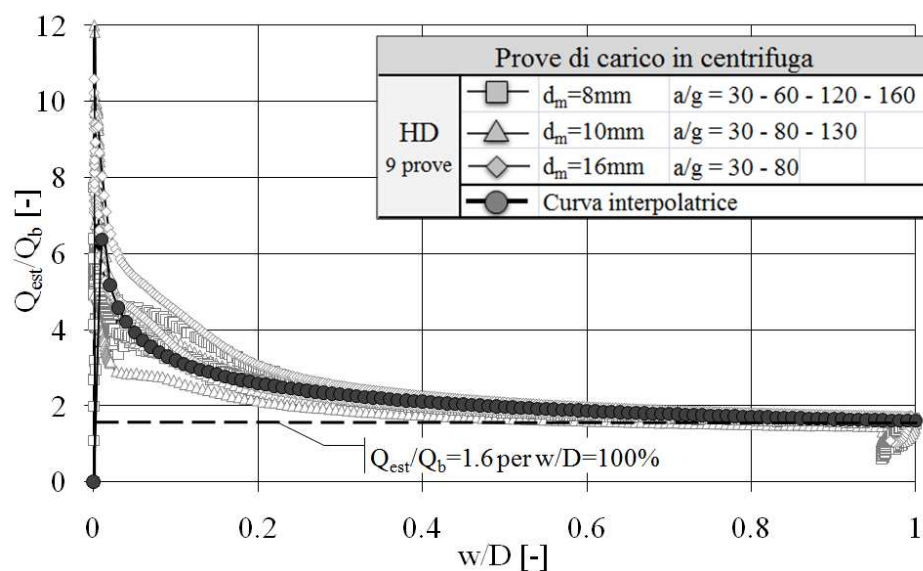
Analogamente  $Q_b$  è esprimibile dal rapporto tra la  $q_b$  unitaria, funzione di  $w/D$ , per l'area di base del palo  $A_b$ . La portata di base unitaria è determinabile dalla sua curva di mobilitazione (5.15). Si ottiene pertanto:

$$Q_b = q_b A_b = q_{bu} [1 - (1 - w/D)^a]^{1/c} (\pi D^2)/4 \quad [F] \quad (5.20)$$

Dividendo la (5.19) rispetto alla (5.20), si osserva che la ripartizione del carico esterno tra portata di base e portata laterale, per i pali trivellati in sabbia, è funzione diretta della densità relativa, dello stato tensionale efficace a fine installazione, e della snellezza del palo.



-Figura 5.17 –Mobilitazione della portata di base al variare del cedimento normalizzato  $w/D$ , durante le prove di carico in centrifuga su pali trivellati in sabbia a MD; curva interpolatrice a MD.



-Figura 5.18 –Mobilitazione della portata di base al variare del cedimento normalizzato  $w/D$ , durante le prove di carico in centrifuga su pali trivellati in sabbia a HD; curva interpolatrice a HD.

## **CAPITOLO 6**

---

### **CONCLUSIONI**

---

#### **6.1 CONCLUSIONI**

La ricerca condotta durante il triennio di dottorato si è concentrata sul comportamento del palo trivellato isolato installato in sabbia e caricato assialmente in trazione e compressione.

I risultati ottenuti da una campagna sperimentale di circa 60 prove di carico in centrifuga e circa 150 prove di taglio diretto a rigidità normale imposta hanno permesso di approfondire i meccanismi di trasmissione del carico di un'inclusione rigida in un terreno granulare secco e omogeneo, in particolare quelli sviluppati all'interfaccia.

I pali modello a superficie rugosa, di 4 differenti geometrie, idealmente trivellati in campioni di sabbia secca FF, ricostruiti a media ( $D_R \approx 50\%$ ) e alta ( $D_R \approx 80\%$ ) densità relativa, sono stati testati a differenti livelli di accelerazione centrifuga variabili tra 30g e 160g, permettendo di simulare una vasta gamma di prototipi, con diametri  $D_p$  da 0.24 m a 4.16 m e lunghezze  $L_p$  comprese tra 4.8 m e 41.6 m. Le prove di carico sono state condotte applicando carichi assiali di trazione e di compressione.

Le principali conclusioni sono state divise in funzione degli obiettivi perseguiti nella tesi, distinti in progettuali e sperimentali.

##### **6.1.1 CONCLUSIONI RELATIVE AGLI OBIETTIVI PROGETTUALI**

Il metodo  $\beta$  costituisce uno degli approcci progettuali più diffusi. I risultati delle prove di carico in centrifuga hanno fornito valori del coefficiente di trasferimento dell'attrito laterale in accordo con i dati di letteratura, relativi a pali trivellati in vera grandezza installati in terreni prevalentemente sabbiosi. Gli andamenti di  $\beta$  hanno confermato la riduzione del coefficiente con la profondità, probabilmente dovuta alla riduzione dell'effetto della dilatanza al crescere della tensione di

confinamento. Il maggiore attrito sviluppato dai pali in depositi densi è stato colto correttamente dal metodo, che ha fornito valori di  $\beta$  da prove a HD superiori a quelli a MD, specie in superficie. Dai risultati ottenuti, non è stata riscontrata una sistematica differenza dei coefficienti tra prove in trazione e in compressione.

Un approccio empirico è stato formulato per la stima di  $\tau_{su}$ , il quale, utilizzando le curve di mobilitazione dell'attrito ricavate dalle prove in centrifuga, ha permesso di determinare l'incremento della tensione normale al fusto del palo; la funzione analitica proposta ha tenuto in conto la densità relativa e la tensione normale al fusto, agente alla fine dell'installazione.

La portata di base ultima di un palo trivellato in sabbia è generalmente determinata stimando il fattore di capacità portante  $N_q$ . L'analisi delle prove in centrifuga ha portato ad evidenziare una dipendenza del coefficiente di capacità portante dal grado di addensamento della sabbia che influisce sulla variabilità del valore di  $N_q$ , per il quale è stata proposta una nuova correlazione.

Dai risultati ottenuti dalle prove di carico in centrifuga, sono state inoltre formulate due relazioni per la determinazione della portata di base critica al variare dello spostamento relativo  $w/D$ : la prima funzione del risultato di una prova penetrometrica statica, la seconda dei parametri di stato del deposito sabbioso al momento dell'installazione del palo.

Infine, dalle curve di mobilitazione dell'attrito laterale e della portata di base unitaria, sono stati stimati i due contributi di capacità portante nel caso in cui il cedimento del palo sia tale da non raggiungere i valori ultimi di resistenza.

### **6.1.2 CONCLUSIONI RELATIVE AGLI OBIETTIVI SPERIMENTALI**

Dall'analisi degli effetti scala che interessano la mobilitazione delle tensioni tangenziali si è evinto che il livello di accelerazione prescelto per la prova non condiziona i valori di  $\tau_{su}$  e  $w_{su}$ . Essi sono risultati inoltre indipendenti dall'effetto scala legato alla dimensione dell'inclusione rigida rispetto al diametro dei grani  $D_{50}$  della sabbia di prova per  $d_m/D_{50} \geq 80$ . Valori della rugosità normalizzata maggiori della soglia critica, stimata come  $R_{n|cr} \approx 0.2$  per la sabbia FF di prova, non producono effetto scala sulla curva di mobilitazione delle tensioni tangenziali. Infine, da coppie di modelli del modello a differenti densità relative e con carico assiale nelle due opposte direzioni, è risultato assente l'effetto del diametro del palo sulla tensione tangenziale di picco.

La legge di scala che controlla il cedimento a cui si mobilita l'attrito laterale non risponde alle leggi del continuo per il formarsi di una banda di taglio. Dal confronto tra i cedimenti ottenuti da prove in centrifuga e quelli ricavati da prove in vera grandezza, distinti in funzione della densità relativa e della direzione del carico, si è ipotizzato che il rapporto tra lo spostamento misurato in scala modello e quello in scala prototipo sia pari a 10, indipendente dal livello di accelerazione imposto. Il valore è probabilmente legato al comportamento della banda di taglio.

Le prove in centrifuga su pali modello rugosi sono state inoltre utilizzate per investigare l'effetto della direzione del carico assiale sul valore della tensione tangenziale di picco. I risultati ottenuti hanno confermato che la tensione tangenziale di picco, mobilitata sull'intero palo, è maggiore in compressione rispetto che in trazione. Tuttavia, la valutazione dell'attrito medio mobilitato al picco sui singoli conci, ha permesso di ipotizzare la formazione di un bulbo detensionato attorno alla base che si genera per piccolissimi sfilamenti del palo e aumenta la sua estensione al progredire di  $w$ . In tale zona le tensioni normali al fusto del palo si riducono producendo localmente un minore attrito laterale all'interfaccia (concio inferiore) e globalmente una diminuzione della portata laterale di trazione. Al contrario, nel concio superiore del palo modello, sufficientemente lontana dalla zona disturbata alla base, le tensioni tangenziali al picco, sviluppate in trazione, sono uguali a quelle ottenute in compressione. L'effetto sembra ridursi al crescere della densità relativa e della dimensione del palo.

## **6.2 FUTURI SVILUPPI**

Considerata la notevole quantità di dati sperimentali ottenuti dalle prove di modellazione fisica, la simulazione numerica dei modelli testati costituisce un naturale proseguimento dell'indagine qui sviluppata. Di particolare interesse è la quantificazione della variazione tensionale normale al fusto del palo in funzione delle condizioni di confinamento, che consentirebbe nuove formulazioni per il calcolo della resistenza laterale dei pali trivellati in sabbia.

Per approfondire lo studio del comportamento dell'interfaccia, che controlla la mobilitazione dell'attrito, un'indagine di meccanica particellare, mirata ad analizzare nello specifico l'interazione del palo trivellato con la sabbia circostante, permetterebbe di chiarire molti aspetti connessi alla reale dimensione di tale fascia di terreno ed alla sua evoluzione durante la prova di carico, con particolare interesse alla variazione del suo spessore. Inoltre, un'analisi a questa scala di dettaglio

permetterebbe di osservare se esiste una relazione tra la dimensione della banda di taglio e il cedimento a cui si mobilita il picco tensionale, portando nuovi elementi per l'individuazione della legge di scala dello spostamento. Ulteriori informazioni utili ad approfondire la tematica potrebbero essere ricavate dall'esecuzione di prove di carico in centrifuga eseguite utilizzando una sabbia di differente granulometria e mineralogia, rispetto alla sabbia FF impiegata in questa sperimentazione, avendo cura di minimizzare gli effetti scala.



---

## ***BIBLIOGRAFIA***

---

- Airey D. W., Kelly R. B., 2008. *Interface behaviours from large diameter ring shear tests*. CBI 2008, Research Symposium on the Characterization and Behavior of Interfaces, edited by J. D. Frost, Atlanta.
- Al-Douri R. H., Poulos H. G., 1991. *Static and cyclic direct shear tests on carbonate sands*. Geotechnical Testing Journal, vol. 15, n. 2, pp. 138-157.
- Al-Mhaidib A. I., Edil T. B., 1998. *Model tests for uplift resistance of piles in sand*. Geotechnical Testing Journal, vol. 21, n. 3, pp. 213-221.
- Alsamman O. M., 1995. *The use of CPT for calculating axial capacity of drilled shafts*. PhD Thesis, University of Illinois.
- Alshibli K. A., Hasan A., 2008. *Spatial variation of void ratio and shear band thickness in sand using X-ray computed tomography*. Géotechnique, vol. 58, n. 4, pp. 249-257.
- Balachowski L., 1995. *Différents aspects de la modélisation physique du comportement des pieux: chambre d'étalonnage et centrifugeuse*. Tesi di dottorato, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Balachowski L., 2006. *Scale effect in shaft friction from the direct shear interface tests*. Archives of Civil and Mechanical Engineering, vol. 6, n. 3, pp. 13-28.
- Baldi G., Bellotti R., Ghionna, V., Jamiolkowski M., Pasqualini E., 1986. *Interpretation of CPTs and CPTUs – part II: drained penetration in sands*. Proc. 4<sup>th</sup> Int. Geotechnical Seminar on Field Instrumentation and in situ measurements, Singapore, pp. 143-156.

- Baldi G., Belloni G., Maggioni W., 1988. *The ISMES geotechnical centrifuge*. Centrifuge 88, Corté ed., Balkema, Rotterdam, pp. 45-48.
- Baldi G., Maggioni W., Renzi R., 1989. *Modellazione fisica di fenomeni dinamici*. XIV C. G. T., Torino.
- Becci B., Nova R., Baù A., Haykal R., 2007. *Prove di carico su pali di grande diametro mediante l'impiego di celle Osterberg*. Rivista Italiana di Geotecnica, n. 4, pp. 9-28.
- Berezantzev V. G., 1963. *On elasto-plastic state of stress under deep foundations*. Bases Foundations and Soil Mechanics, n. 5, in Russian.
- Berezantzev V. G., 1970. *Computation of foundations*. Leningrad, URSS, in Russian.
- Bolton M. D., 1986. *The strength and dilatancy of sands*. Géotechnique, vol. 36, n. 1, pp. 65-78.
- Bolton M. D., Lau C. K., 1988. *Scale effects arising from particle size*. Centrifuge 88, Cordé ed, Balkema, Rotterdam, pp. 127-131.
- Bolton M. D., Gui M. W., Garnier J., Corte J. F., Bagge G., Laue J., Renzi R., 1999. *Centrifuge cone penetration tests in sand*. Géotechnique, vol. 49, n. 4, pp. 543-552.
- Boulon M., Foray P., 1986. *Physical and numerical simulation of lateral shaft friction along offshore piles in sand*. 3<sup>rd</sup> International Conference on Numerical Methods in Offshore Piling, Nantes, pp. 127-147.
- Boulon M., 1988. *Numerical and physical modelling of piles behaviour under monotonous and cyclic loading*. International Symposium SOWAS '88, Kolkman et al. eds, Balkema, Rotterdam, pp. 285-293.
- Boulon M., Nova R., 1990. *Modelling of soil-structure interface behaviour. A comparison between elasto-plastic and rate-type laws*. Int. Journ. Computer and Geotechnics, vol. 9, pp. 21-46.
- Bowles J. E., 1998. *Fondazioni: progetto e analisi*. McGraw-Hill ed.
- Bridgman P. W., 1931. *Dimensional analysis*. Yale University Press, New Haven.
- Bridgwater J., 1980. *On the width of failure zones*. Géotechnique, vol. 30, n. 4, pp. 533-536.
- Buckingham E., 1914. *On the physically similar systems; illustrations of the use of dimensional analysis*. Physical Revue, n. 4, pp. 345-376.

- Bucky P., 1931. *Use of models for the study of mining problems*. Technical publication n. 425, Am. Inst. Of Min. & Met. Engng., New York.
- Burland J. B., 1973. *Shaft frictions of piles in clay: a simple fundamental approach*. Ground Engineering, vol. 6, n. 3, pp. 30-38.
- Bustamente M., Gianceselli L., 1981. *Portance réelle et portance calculée des pieux isolés sollicités verticalement*. Revue française de Géotechnique, n. 16, pp. 17-34.
- Bustamente M., Gianceselli L., 1982. *Pile bearing capacity by means of static penetrometer*. Proc. ESOPT II, Amsterdam, vol. 2, pp. 493-500.
- Butterfield R., 1999. *Dimensional analysis for geotechnical engineers*. Géotechnique, vol. 49, n. 3, pp. 357-366.
- Butterfield R., 2000. *Scale-modelling of fluid flow in geotechnical centrifuges*. Soils and Foundations, vol. 40, n. 6, pp. 39-45.
- Chen Y. J., Kulhawy F. H., 1994. *Case history evaluation of the behaviour of drilled shafts under axial and lateral loading*. EPRI TR-104601, Research Project 1493-04, Palo Alto, Ca.
- Chow F. C., 1997. *Investigations into displacement pile behavior for offshore foundations*. PhD thesis, Imperial College, London.
- Chow F. C., Jardine R. J., Nauroy J. F., Brucy F., 1997. *Time-related increases in the shaft capacities of driven piles in sand*. Géotechnique, vol. 47, n. 2, pp. 353-361.
- Collotta T., Formigoni G., Simonetti G., 1989. *Analisi dei risultati di prove di carico assiali su pali di grande diametro strumentati*. XVII Convegno Nazionale di Geotecnica, Taormina, pp. 129-135.
- Colombi A., 2005. *Physical modelling of an isolated pile in coarse grained soils*. PhD Thesis, Università di Ferrara.
- Craig W. H., Sabagh S. K., 1994. *Stress-level effects in model tests on piles*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 31, pp. 28-41.
- Davidenkov N. N., 1933. *The new method of the application of models to the study of equilibrium of soils*. Journ. Tech. Physics, Moscow, n. 3, pp. 131-136.
- De Beer E. E., 1988. *Different behavior of bored and driven piles*. Proc. I Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent, pp. 47-82.

- De Nicola A., Randolph M. F., 1993. *Tensile and compressive shaft capacity of piles in sand*. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 119, n. 12, pp.1952-1973.
- De Nicola A., Randolph F., 1999. *Centrifuge modelling of pipe piles in sand under axial loads*. Géotechnique, vol. 49, n. 3, pp. 295-318.
- Deeks A. D., White D. J., Bolton M. D., 2005. *A comparison of jacked, driven and bored piles in sand*. 16<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Osaka, vol. 3, pp. 2103-2106.
- DeJong J. T., Westgate Z.J., 2008. *Linking global interface response to microscale particle-interface behavior*. CBI 2008, Research Symposium on the Characterization and Behavior of Interfaces, J. D. Frost ed., Atlanta.
- DeJong J. T., Westgate Z.J., 2009. *Role of initial state, material properties and confinement condition on local and global soil-structure interface behavior*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, pp. 1646-1660.
- Desrues J., 1991. *An introduction to strain localization in granular materials*. Proceedings of Winter School Les Houches, Dodds J.A. and Bideau D. ed., Nova Sciences Publ., pp. 127-142.
- Dietz M. S., 2000. *Developing an holistic understanding of interface friction using sand within the direct shear apparatus*. PhD thesis, University of Bristol.
- Dumitrescu A. I., Coredir A., Frank R., 2009. *Influence of the anisotropy of confining stress on the sand-steel interface behaviour in a cylinder shear apparatus*. Soils and Foundations, vol. 49, n. 2., pp. 167-174.
- Durgunoglu H. T., Mitchell J. K., 1975. *Static penetration resistance of soils, I- analysis, II-evaluation of the theory and implications for practice*. Specialty Conf. in Situ Measurements of soil properties, ASCE, North Carolina, State Univ., Raleigh, NC, USA, vol. 1, pp. 151-171.
- Fahey M., Lehane B., Stewart D., 2003. *Soil stiffness for shallow foundation design in the Perth CBD*. Australian Geomechanics Journal, n. 38, pp. 61-90.
- Falconio G., Mandolini A., 2003. *Influence of residual stresses for non displacement cast in situ piles*. Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Van Impe ed., Millpress, Rotterdam, pp. 145-152.

- Ferrero M., 1996. *Comportamento all'interfaccia dei terreni attraverso prove nell'apparecchio di taglio diretto a rigidità normale imposta*. Tesi di Laurea, Politecnico di Torino.
- Fioravante V. 1994. *Centrifuge modelling of piles in sand axially loaded*. Proc. Workshop on pile foundations experimental investigations, analysis and design, CUEN, Napoli, pp. 125-163.
- Fioravante V., Ghionna V. N., Jamiolkowski M., Pedroni S., 1995. *Load carrying capacity of large diameter bored piles in sand and gravel*. Proc. X Asian Regional Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Hong Kong, vol. 2, pp. 3-15.
- Fioravante V., Ghionna V. N., Pedroni S., Porcino D., 1999. *A constant normal stiffness direct shear box for soil-solid interfaces tests*. Rivista Italiana di Geotecnica, vol. 3, pp. 7-22.
- Fioravante V., 2002. *On the shaft friction modelling of non-displacement piles in sand*. Soils and Foundations, vol. 42, n. 2, pp. 23-33.
- Fioravante V., Colombi A., Jamiolkowski M., 2006. *On the effects of residual tangent stresses in centrifuge pile tests*. Proc. 6<sup>th</sup> International Conference on Physical Modelling in Geotechnics, Hong Kong.
- Fioravante V., Guerra L., Jamiolkowski M., 2008. *Tensile shaft capacity of bored piles in sand from centrifuge modeling*. Research Symposium CBI 2008, Atlanta.
- Fleming W. G. K., Weltman A. J., Randolph M. F., Elson W. K., 1992. *Piling engineering*. 2<sup>nd</sup> ed., Blackie (Halsted Press), Glasgow, Scotland.
- Foray P., Balachowski L., Rault G., 1998. *Scale effect in shaft friction due to the localization of deformations*. Centrifuge 98, Kimura, Kusakabe, Takemura eds, Balkema, Rotterdam, pp. 211-216.
- Frank R., 1994. *The new Eurocode and the new French Code for the design of deep foundations*. Proc. Int. Conf. on Design and Construction of Deep Foundations, US-FHWA.
- Franke E. 1989. *Prediction of the load settlement of deep isolated foundations*. Proc. XII ICSMFE ,Rio de Janeiro, vol. 2, pp. 1125-1126.
- Fretti C., Lo Presti C. F., Pedroni S., 1995. *A pluvial deposition method to reconstitute well-graded sand specimens*. Geotechnical Testing Journal, vol. 18, n. 2, pp. 292-298.

- Frost J. D., DeJong J. T., Recalde M., 2002. *Shear failure behavior of granular-continuum interfaces*. Engineering Fracture Mechanics, vol. 69, pp. 2029-2048.
- Fujioka T., Yamada K., 1997. *The development of a new pile load testing system*. Proc. of Int. Conf. on Design and Contruction of Deep Foundations, pp.670-684.
- Garnier J., König D., 1998. *Scale effects in piles and nails loading tests in sand*. Centrifuge 98, Kimura, Kusakabe, Takemura eds, Balkema, Rotterdam, pp. 205-210.
- Garnier J., 2001. *Physical model in geotechnics: state of the art and recent advances*. First Coulomb Lecture, Paris, CFMS ed.
- Garnier J., 2002. *Size effects in shear interfaces*. Constitutive and Centrifuge Modelling: Two Extremes, Springman ed., Swets & Zeitlinger, Lisse, pp. 335-345.
- Garnier J., Gaudin C., 2007. *Catalogue of scaling laws and similitude questions in centrifuge modelling*. Technical Committee TC2, Physical Modelling in Geotechnics.
- Gatti G., Garassino A. L., 1989. *Determinazione sperimentale della portata laterale di pali trivellati in terreno granulare*. XVII convegno AGI, Taormina, pp. 231-239.
- Ghionna V. N., Jamiolkowski M., Lancellotta R., Pedroni S., 1993. *Bearing capacity of bored piles in sands from in situ tests*. Proc. II Int. Geotechnical Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Ghent, pp- 67-75.
- Ghonna V. N., Jamiolkowski M., Pedroni S., Salgado R., 1994. *The tip displacement of drilled shafts in sands*. Proc. Settlement '94, A. Yeung and T. Felio ed. vol. 2, Geotech. Engrg. Div., ASCE, Reston, Va., pp. 1039-1057.
- Gibbs H. J., Holtz W. G., 1957. *Research on determining the density of sands by spoon penetration testing*. Proc. IV ICSMFE, London, vol. 1, pp. 67-75.
- Gwizdala K., 1984. *Large bored piles in non-cohesive soils*. Swedish Geotechnical Institute, Report n. 26.
- Hardin B. O., Blandford G. E., 1989. *Elasticity of particulate materials*. JGE Div. ASCE, vol. 115, n. 6.

- Hoteit N., 1990. *Contribution à l'étude du comportement d'interface sable-inclusion et application au frottement apparent*. Tesi di dottorato, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- Huybrechts N., Maertens J., 2008. *Some new insights with regard to load distribution in piles, based on a detailed interpretation of a large number of instrumented pile load tests*. BAP V, Ghent, pp. 249-256.
- Ingold T. S., 1982. *Some observations on the laboratory measurement of soil-goetextile bond*. Geotechnical testing Journal, vol. 5, n. 3, pp.51-67.
- Isaacson E. de St. Q., Isaacson M. de St. Q., 1975. *Dimensional Methods in engineering and physics*. Edward Arnold ed., London.
- Ismael N. F., 1989. *Field tests on bored piles subject to axial and oblique pull*. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 115, n. 11, pp. 1588-1598.
- Jamiolkowski M., Lancellotta R., 1988. *Relevance of in situ test results for evaluation of allowable base resistance of bored piles in sand*. Proc. 1<sup>st</sup> Int. Geotech. Seminar on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Van Impe ed, Balkema, Rotterdam, pp. 107-120.
- Jamiolkowski M., 1990. *Shear strength of cohesionless soils from CPT*. De Mello volume, ed. Edgar Blucher, San Paulo, Brazil, pp. 191-204.
- Jamiolkowski M., 2000. *Axial load capacity of bored piles in sand and gravel*. Proc. 3<sup>rd</sup> Symposium on Deep Foundation, Mexico City,.
- Jamiolkowski M., Sarri H., 2000. *On axial load capacity of drilled shafts in coarse grained soils*. Homenaje Jimenez Salas ed., Madrid, pp. 111-128.
- Jamiolkowski M., 2003. *Soil parameters relevant to bored pile design from laboratory and in situ tests*. Proc. on Deep Foundations on Bored and Auger Piles, Van Impe ed., Millpress, Rotterdam, pp. 83-102.
- Jamiolkowski M., Lo Presti D. C. F., Manassero M., 2003. *Evaluation of relative density and shear strength from CPT and DMT*. ASCE, GSP n. 119, pp. 201-238.
- Jardine R. J., Lehane B. M., Everton S. J., 1993. *Friction coefficients for piles in sands and silts*. Offshore Site Investigation and Foundation Behaviour, vol. 28, pp. 661-677.
- Jardine R. Y., Chow F. C., 1996. *New design methods for offshore piles*. Dept. of civil Eng., Imperial College, Rub. 96/103, Marine Technology, Doctorate Ltd., London, pp. 661-677.

- Jardine R. J., Chow F. C., Overy R. F., Standing J. R., 2005. *ICP design methods for driven piles in sands and clay*. Thomas Telford ed, London.
- Jewell R. A., Wroth C. P., 1987. *Direct shear tests on reinforced sand*. Géotechnique, vol. 37, n. 1, pp. 53-68.
- Jewell R. A., 1989. *Direct shear tests on sand*. Géotechnique, vol. 39, n. 2, pp.309-322.
- Johnston I. J., Lam T. S. K., Williams A. F., 1987. *Constant normal stiffness direct shear testing for socketed pile design in weak rock*. Géotechnique, vol. 37, n. 1, pp. 83-89.
- Kline S. J., 1965. *Similitude and approximation theory*. McGraw Hill, New York.
- Kostantinidis B., Pacal A. J., Shively A. W., 1987. *Uplift capacity of drilled piers in desert soils*. Proceedings of Foundations for Transmission Line Towers, ASCE Geotechnical Special Publication n. 8.
- Krabbenhoft S., Clausen J., Damkilde L., 2006. *Tension tests on bored piles in sand*. Symposium International ELU/ULS, pp. 87-94.
- Krabbenhoft S., Andersen A., Damkilde L., 2008. *The tensile capacity of bored piles in frictional soils*. Canadian Geotech. Journ., vol. 45, pp. 1715-1722.
- Kulhawy F. H., Kozera D. W., Withiam J. L., 1979. *Uplift testing on model drilled shafts in sand*. Journal of Geotechnical Engineering Division, ASCE, vol. 105, n. GT1, pp. 31-47.
- Kulhawy F. H., 2004. *On the axial behavior of drilled foundations*. GeoSupport 2004: Drilled Shafts, Micropiling, Deep Mixing, Remedial Methods & Specialty Foundation Systems, J. P. Turner & P. W. Mayne ed., ASCE, Reston, pp. 34-51.
- Lade P. V., 1984. *Mechanics of engineering materials*. Edited by C. S. Desai, Chichester, Wiley.
- Lancellotta R., 1983. *Analisi di affidabilità in ingegneria geotecnica*. Atti dell'Istituto di Scienza delle Costruzioni, n. 625, Politecnico di Torino, Torino.
- Lancellotta R., Calavera J., 1999. *Fondazioni*. Mc-Graw-Hill ed.
- Lancellotta R., 2004. *Geotecnica*. Terza edizione, Zanichelli ed.
- Langhaar H. L., 1951. *Dimensional analysis and theory of models*. John Wiley and Sons Inc., New York.



- Lee J. H. , Salgado R., 1999. *Determination of pile base resistance in sand*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 125, n. 8, pp. 673-683.
- Lehane B. M., Jardine R. J., Bond A. J., Frank R., 1993. *Mechanisms of shaft friction in sand from instrumented pile tests*. Journal of Geotechnical Engineering, vol. 119, n. 1, pp. 19-35.
- Lehane B. M., Jardine R. J., 1994. *Shaft capacity of driven piles in sand*. Proc. Conf. Behaviour of offshore structures, pp. 23-26.
- Lehane B. M., Gaudin C., Schneider J. A., 2005. *Scale effects on tension capacity for rough piles buried in dense sand*. Géotechnique, vol. 55, n. 10, pp. 709-719.
- Lehane B. M., White D. J., 2005. *Lateral stress changes and shaft friction for model displacement piles in sand*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 42, pp. 1039-1052.
- Le Kouby A., Rocher-Lacoste F., Lambert S., Liausu P., 2008. *Static field load test on foundations: case study of rigid inclusion*. BAP V, Ghent, pp. 269-274.
- Lings M. L., Dietz M. S., 2005. *The peak strength of sand-steel interfaces and the role of dilation*. Soils and Foundations, vol. 45, n. 6, pp. 1-14.
- Lo Presti D. C. F., 1995. *General report: measurement of shear deformation of geomaterials in the laboratory*. Pre-failure deformation of geomaterials. Shibuya, Mitachi & Miura ed., Balkema, Rotterdam, vol. 2, pp. 1067-1088.
- Maertens J., Huybrechts N., 2003. *Belgian screw pile technology. Design and recent developments*. Proc. II Symposium on screw piles, Balkema ed.
- Mandolini A., 1995. *Prove di carico su pali di fondazione*. Hevelius ed.
- Maiorano R. S. M., Viggiani C., Randolph M. F., 1996. *Residual stress system arising from different methods of pile installation*. Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. on application of stress-wave theory to piles, Orlando, pp. 518-528.
- Marchetti S., 1997. *Flat dilatometer design, applications*. Keynote Lecture, III Int. Geotechnical Engineering Conf., Cairo University, Cairo, Egypt, pp. 421-428.

- Mortara G., 2001. *An elastoplastic model for sand-structure interface behavior under monotonic and cyclic loading*. PhD Thesis. Politecnico di Torino.
- Mühlhaus H. B., Vardoulakis I., 1987. *The thickness of shear bands in granular materials*. Géotechnique, vol. 37, n. 3, pp. 271-283.
- Oda M., Kazama H., 1998. *Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils*. Géotechnique, vol. 48, n. 4, pp. 465-481.
- Oda M., Iwashita K., 2000. *Study on couple stress and shear band development in granular media based on numerical simulation analyses*. International Journal of Engineering Science, vol. 38, pp. 1713-1740.
- O'Neill M. W., Hassan K. M., 1994. *Drilled shafts: effects of construction on performance and design criteria*. Proc. Int. Conf. on Design and Construction of Deep Foundations, Orlando, vol. 1, pp.137-187.
- O'Neill M., Reese L. C., 1999. *Drilled shafts: construction procedures and design method*. Publication n. ADSC-TL-4, publication n. FHWA-IF-99-025, Federal Highway Administration, Washington D. C.
- O'Neill M. W., 2001. *Side resistance in piles and drilled shafts*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, pp. 3-16.
- Ooi L. H., Carter J. P., 1987. *A constant normal stiffness direct shear device for static and cyclic loading*. Geotechnical Testing Journal, vol. 10, n. 1, pp. 3-12.
- Paikowsky S. G., Player C. M., Connors P. J., 1995. *A dual interface apparatus for testing unrestricted friction of soil along solid surfaces*. Geotechnical Testing Journal, vol. 18, n. 2, pp. 168-193.
- Paikowsky S. G., Player C. M., Connors P. J., 1996. *Closure*. Geotechnical Testing Journal, vol. 19, n. 4, pp. 447-451.
- Palacios J., 1964. *Dimensional analysis*. Mac-Millan, London.
- Phillips E., 1869a. *De l'équilibre des solides élastiques semblables*. C. R. Acad. Sci. Paris, n. 68, pp. 75-79.
- Phillips E., 1869b. *Du mouvement des corps solides élastiques semblables*. C. R. Acad. Sci. Paris, n. 69, pp. 911-912.

- Pokrowsky G. Y., 1933. *On the application of centrifugal force for modeling earth works in clay*. Jour. Tech. Physics, Moscow, n. 3, pp. 537-539.
- Pokrowsky G. Y., Fedorov I. S., 1936. *Studies of soil pressures and soil deformations by means of a centrifuge*. Proceedings of 1<sup>st</sup> ICSMFE, Moscow, vol. 1, p. 70.
- Porcino D., Fioravanete V., Ghionna V. N., Pedroni S., 2003. *Interface behavior of sands from constant normal stiffness direct shear tests*. Geotechnical Testing Journal, vol. 26, n. 3, pp. 289-301.
- Potyondy J. G., 1961. *Skin friction between various soils and construction materials*. Géotechnique, vol. 2, n. 4, pp. 339-353.
- Poulos H. G., Carter J. P., Small J. C., 2001. *Foundations and retaining structures: research and practice*. Proceedings of the 15<sup>th</sup> International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Istanbul, vol. 4, pp. 2527-2606.
- Reddy E. S., Chapman D. N., Sastry V. V. R. N., 2000. *Direct shear interface test for shaft capacity of piles in sand*. Geotechnical Testing Journal, vol. 23, n. 2, pp. 199-205.
- Reese L. C., O'Neill M. W., 1988. *Drilled shafts: construction procedures and design methods*. Publication FHWA-HI-88-042, Federal Highway Administration, Washington D. C.
- Rezende M. E. B., Garnier J., Rault G., Cintra J. C. A., 1998. *Effect of friction developed by centrifuge acceleration on pile loading tests results*. Centrifuge 98, Kimura, Kusakabe, Takemura eds, Balkema, Rotterdam, pp. 501-506.
- Riot A., 1996. *Etude des interfaces sol-structure. Effets d'échelle*. Report interno, Génie Mécanique & Productique, LCPC, Nantes.
- Robinsky E. I., Morrison C. F., 1964. *Sand displacement and compaction around model friction piles*. Canadian Geotechnical Journal, vol. 1, n. 2, pp. 81-93.
- Rocchi G. F., Albert L. F., Vacca O., Nardocci A., Salvi M., Montinaro N., 1989. *Prove di carico strumentate a rottura su pali di grande diametro trivellati in sabbia*. XVII Convegno Nazionale di Geotecnica, Taormina, pp. 309-322.
- Rocher-Lacoste F., Bustamante M., England M., 2008. *Bi-directional instrumented load test of a pile bored in Guinea Bissau*. BAP V, Ghent, pp. 263-268.

- Roscoe K. H., 1968. *Soil and model tests*. Journal of strain analysis, vol. 3, pp.57-64.
- Roscoe K. H., 1970. *The influence of strains in soil mechanics*. Géotechnique, vol. 20, n. 2, pp. 129-170.
- Rowe P. W., Craig W. H., Procter D. C., 1977. *Dinamically loaded centrifugal model foundation*. Proc. 9<sup>th</sup> Int. Conference on Soil Mech., ICSMFE, Tokyo, vol. 2, pp. 359-364.
- Sarri H., 2001. *Pali trivellati in sabbia soggetti a carico assiale: modellazione fisica e numerica*. Tesi di dottorato, Politecnico di Torino.
- Sartoris J.-Ch., Chambon P., König D., 1998. *Scale effects of small diameter cylindrical inclusion in sand*. Centrifuge 98, Kimura, Kusakabe, Takemura eds, Balkema, Rotterdam, pp. 199-204.
- Scarpelli G., Wood D. M., 1982. *Experimental observations of shear band patterns in direct shear tests*. IUTAM Conference on Deformation and Failure of Granular Materials, Delft, pp.473-484.
- Schlosser F., Guilloux A., 1979. *Le frottement sol-armature dans les ouvrages en terre armée*. C. R. Coll. International Renforcement des Sols, Paris, pp. 151-156.
- Schlosser F., Guilloux A., 1981. *Le frottement dans le renforcement des sols*. Revue Française de Géotechnique, n. 16, pp. 65-77.
- Schneider J. A., 2007. *Analysis of piezocone data for displacement pile design*. PhD Thesis, Western Australia University.
- Schofield A. N., 1980. *Cambridge geotechnical centrifuge operations*. Géotechnique, n. 30, pp. 227-268.
- Sowa V. A., 1970. *Pulling capacity of concrete cast in situ bored piles*. Canadian Geotech. Journal, vol. 7, pp. 482-493.
- Stroud M. A., 1971. *The behaviour of sand at low stress levels in the simple-shear apparatus*. Dissertation, University of Cambridge.
- Subba Rao K. S., Venkatesh K. H., 1985. *Uplift behaviour of short piles in uniform sand*. Soils and Foundations, vol. 25, n. 4, pp. 1-7.
- Tabucanon J. T., Airey D. W., Poulos H. G., 1995. *Pile skin friction in sands from constant normal stiffness tests*. Geotechnical Testing Journal, vol 18, n. 3, pp. 350-364.

- Tan Y. C., Chen C. S., Liew S. S., 1998. *Load transfer behaviour of cast-in-place board piles in tropical residual soils of Malaysia*. 13<sup>th</sup> Southeast Asian Geotech. Conf., Taipei, pp. 563-571.
- Tatsuoka F., 1985. *On the angle of interface friction for cohesionless soils*. Soils and Foundations, vol. 25, n. 4, pp. 135-141.
- Tatsuoka F., 1989. *Shear-band formation related to scale effect in bearing capacity of footing on sand. Experimental results*. II IBF-KGPG Workshop, Gdansk.
- Taylor R. N., 1995. *Centrifuges in modeling: principles and scale effects*. Geotechnical Centrifuge Technology, R. N. Taylor ed., Geotechnical Engineering Research Centre, City University, London, pp. 19-33.
- Troni F., 1997. *Studio sperimentale sulla mobilitazione dell'attrito laterale al contatto fra terreni sabbiosi ed inclusioni*. Tesi di Laurea, Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica, Politecnico di Torino.
- Tucker K. D., 1987. *Uplift capacity of drilled shafts and driven piles in granular materials*. Foundations and Transmission Line Towers, J. L. Briaud ed., ASCE New York, pp. 142-159.
- Turner J. P., Kulhawy F. H., 1994. *Physical modeling of drilled shaft side resistance in sand*. Geotechnical Testing Journal, vol. 17, n. 3, pp. 282-290.
- Uesugi M., Kishida H., 1986. *Influential factors of friction between steel and dry sands*. Soils and Foundations, vol. 26, n. 2, pp. 33-46.
- Uesugi M., Kishida H., 1986a. *Frictional resistance at yield between dry sand and mild steel*. Soils and Foundations, vol. 26, n. 4, pp. 139-149.
- Van Impe W. F., De Beer E. E., Lousberg E., 1988. *Prediction of the single bearing capacity in granular soils out of CPT results*. Proc. ISOPT '88, specialty session, Orlando, pp. 1-34.
- Vesic A. S., 1977. *Design of pile foundations*. TRB, Nat. Coop. Highway Research Program, synthesis of highway practice, n. 42.
- Wernick E., 1978. *Skin friction of cylindrical anchors in non-cohesive soils*. Symposium on Soil Reinforcing and Stabilising Techniques, Sydney, pp. 201-219.
- Wood D. M., 2004. *Geotechnical modeling*. Spoon Press.

- Yang J., 2006. *Influence zone for end bearing of piles in sand*. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, vol. 132, n. 9, pp. 1229-1237.
- Yasufuku N., Ochiai K., Maeda Y., 1997. *Geotechnical analysis of skin friction of cast in place piles*. Proc. 14<sup>th</sup> Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Vol. 2, pp. 921-924.
- Yoshimi Y., Kishida T., 1981. *Friction between sand and metal surface*. 10<sup>th</sup> International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Stoccolma, pp. 831-834.
- Yoshimi Y., Kishida T., 1981a. *A ring torsion apparatus for evaluating friction between soil and metal surface*. Geotechnical Testing Journal, vol. 4, n. 4, pp. 145-152.
- Yu H. D., Houlsby G. T., 1991. *Finite cavity expansion in dilatant soils: loading analysis*. Géotechnique, vol. 41, n. 2, pp. 173-183.
- Yu H. D., 2000. *Cavity expansion methods in geomechanics*. Kluwer Academic Publisher.

# *ALLEGATO A*

---

### ***RISULTATI DELLE PROVE DS - CNS***

---

Le schede mostrate nell'Allegato A riguardano le prove DS-CNS eseguite su campioni di sola sabbia e con interfacce  $R_n=0.6$  e  $R_n=0.8$ .

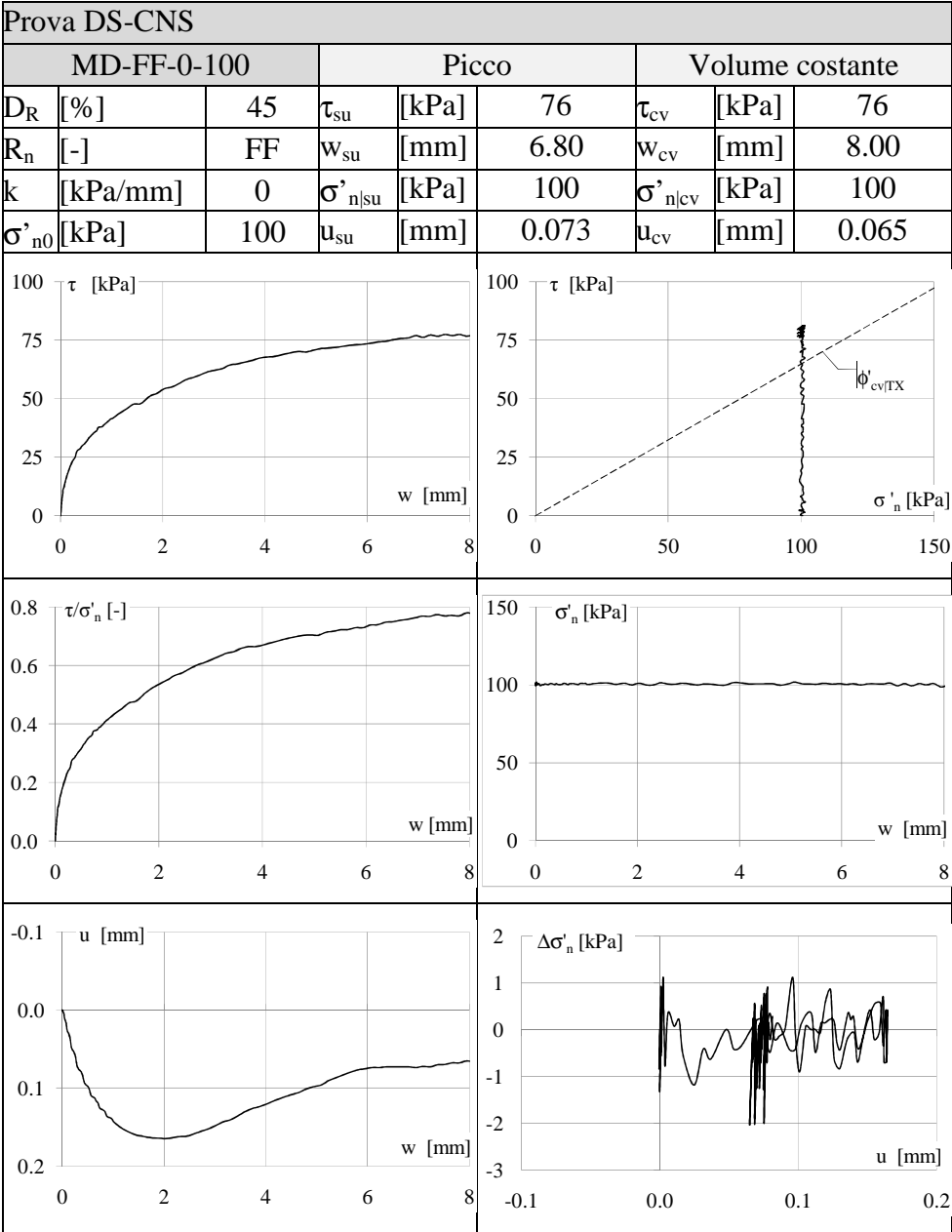
Le prove sono ordinate per densità relativa (MD – HD), per rigidità normale imposta ( $k=0$  kPa/mm,  $k=100$  kPa/mm e  $k=1000$  kPa/mm) e per tensione normale iniziale ( $\sigma'_{n0}=25$  kPa,  $\sigma'_{n0}=75$  kPa,  $\sigma'_{n0}=100$  kPa,  $\sigma'_{n0}=150$  kPa,  $\sigma'_{n0}=300$  kPa).

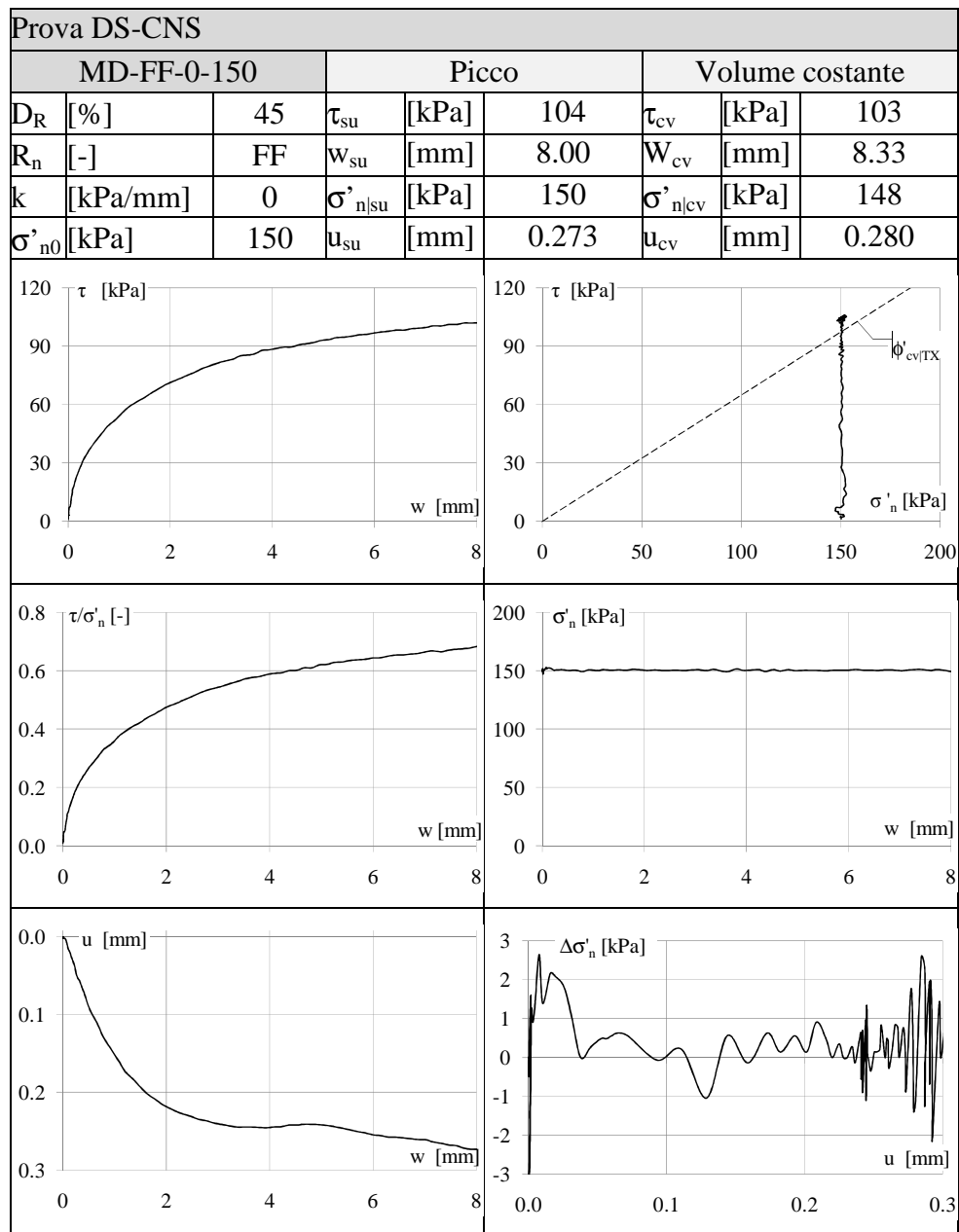
I valori rappresentativi sono riportati in ciascuna scheda, distinguendo la condizione di picco da quella volume costante.

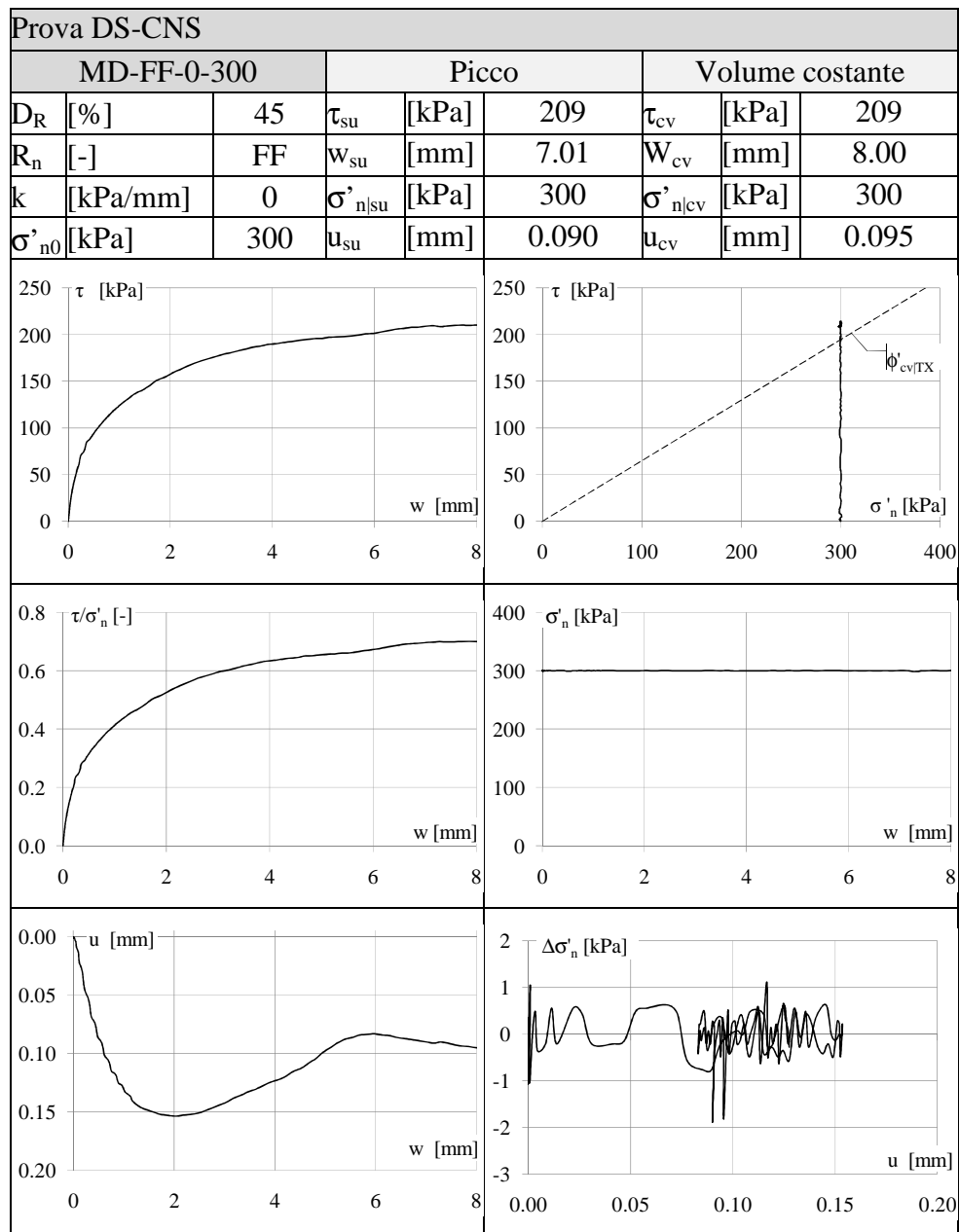
I grafici presentati nelle schede riassuntive sono:

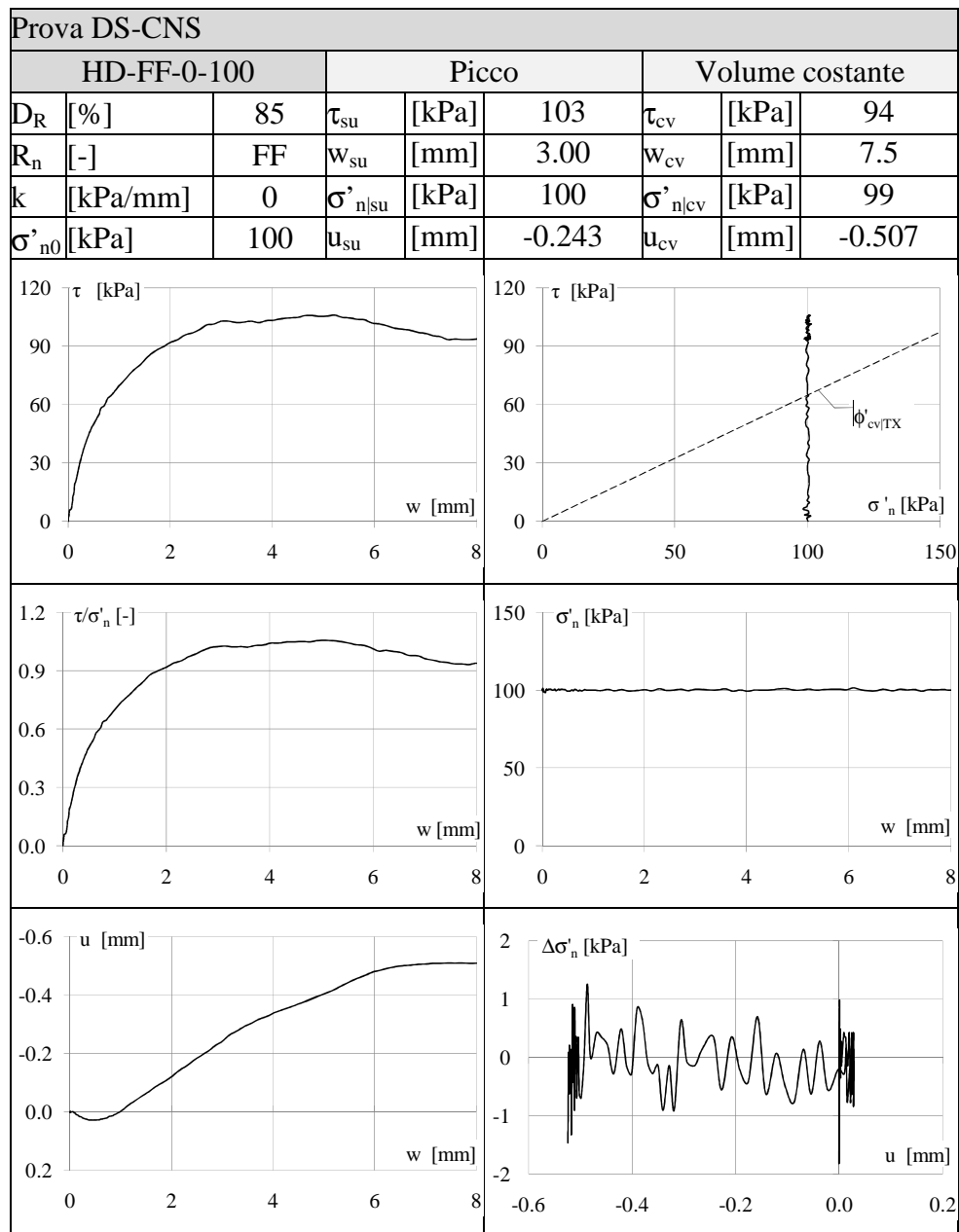
- $\tau - w$  tensione tangenziale in funzione dello scorrimento orizzontale;
- $\tau - \sigma'_n$  tensione tangenziale in funzione della tensione normale al provino; è indicata la linea di rottura con pendenza  $\phi'_{cv|TX}=33^\circ$  della sabbia FF;
- $\tau/\sigma'_{n-w}$  tensione tangenziale normalizzata rispetto a quella normale in funzione dello spostamento orizzontale;
- $\sigma'_{n-w}$  tensione normale in funzione dello scorrimento orizzontale;
- $u - w$  spostamento verticale in funzione di quello orizzontale; per le prove condotte con 3 LVDT verticali di misura, sono riportati i singoli andamenti ottenuti da ciascuno strumento e l'andamento medio;
- $\Delta\sigma'_{n-u}$  variazione di tensione normale, calcolata rispetto al valore  $\sigma'_{n0}$  iniziale, in funzione dello spostamento verticale.

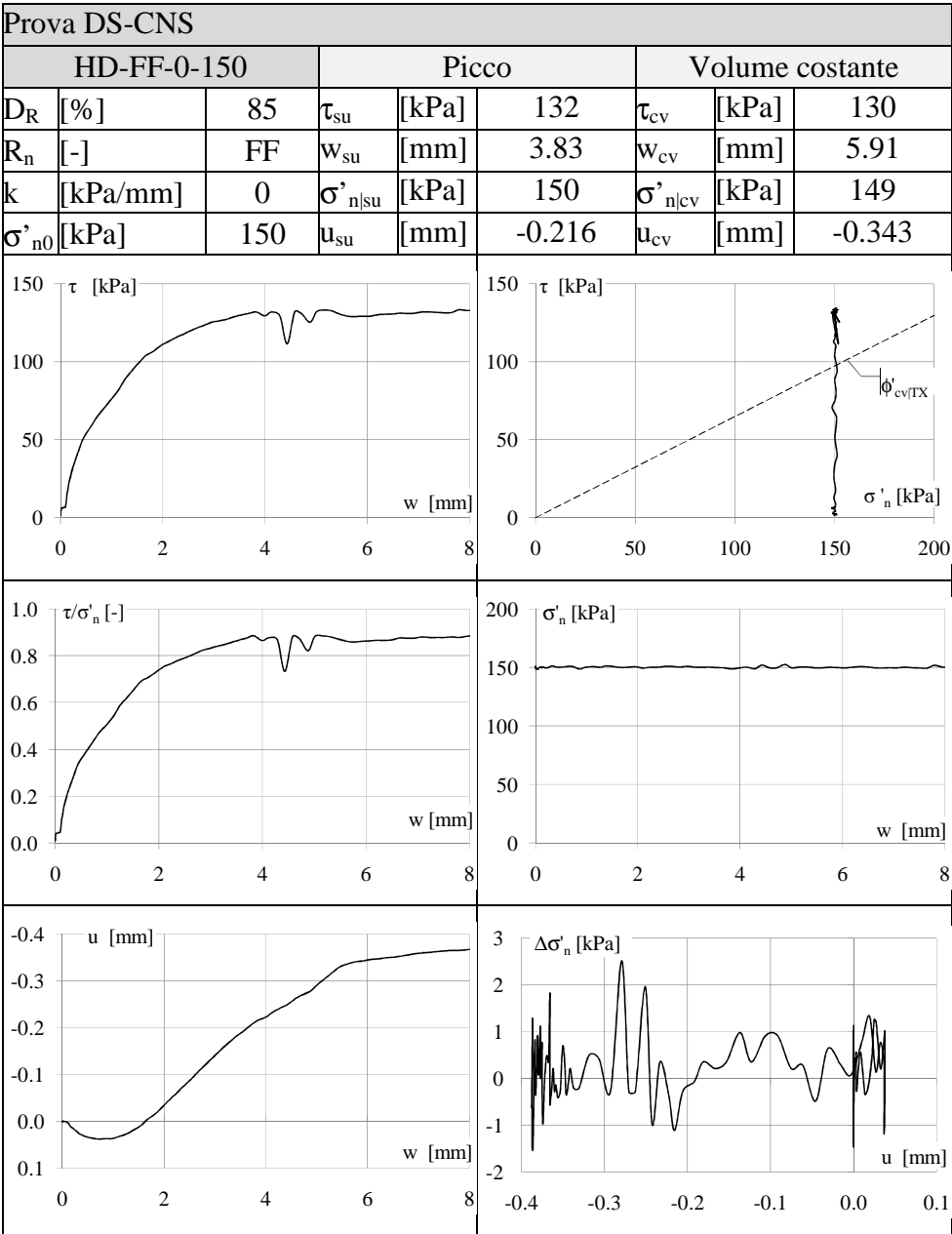


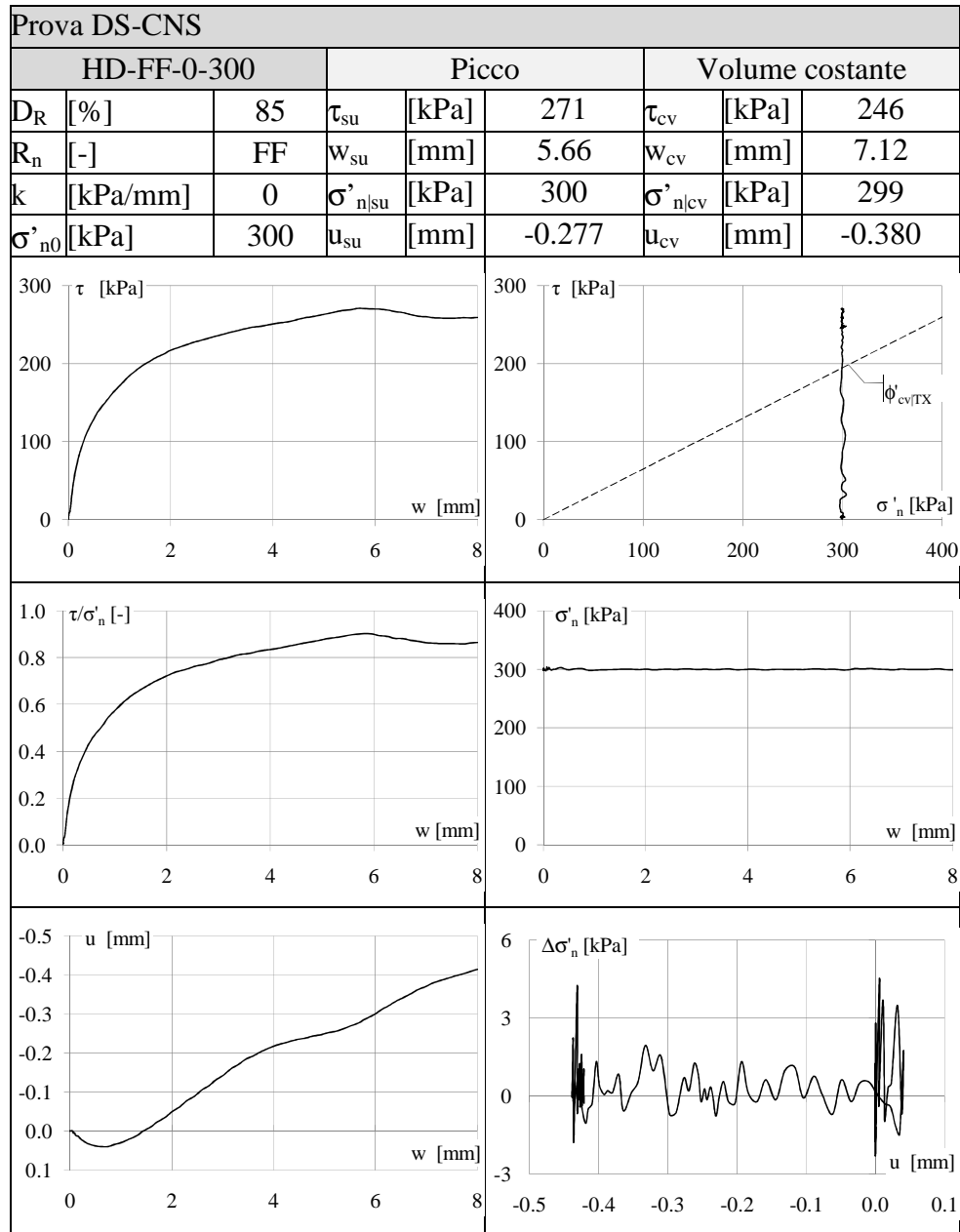


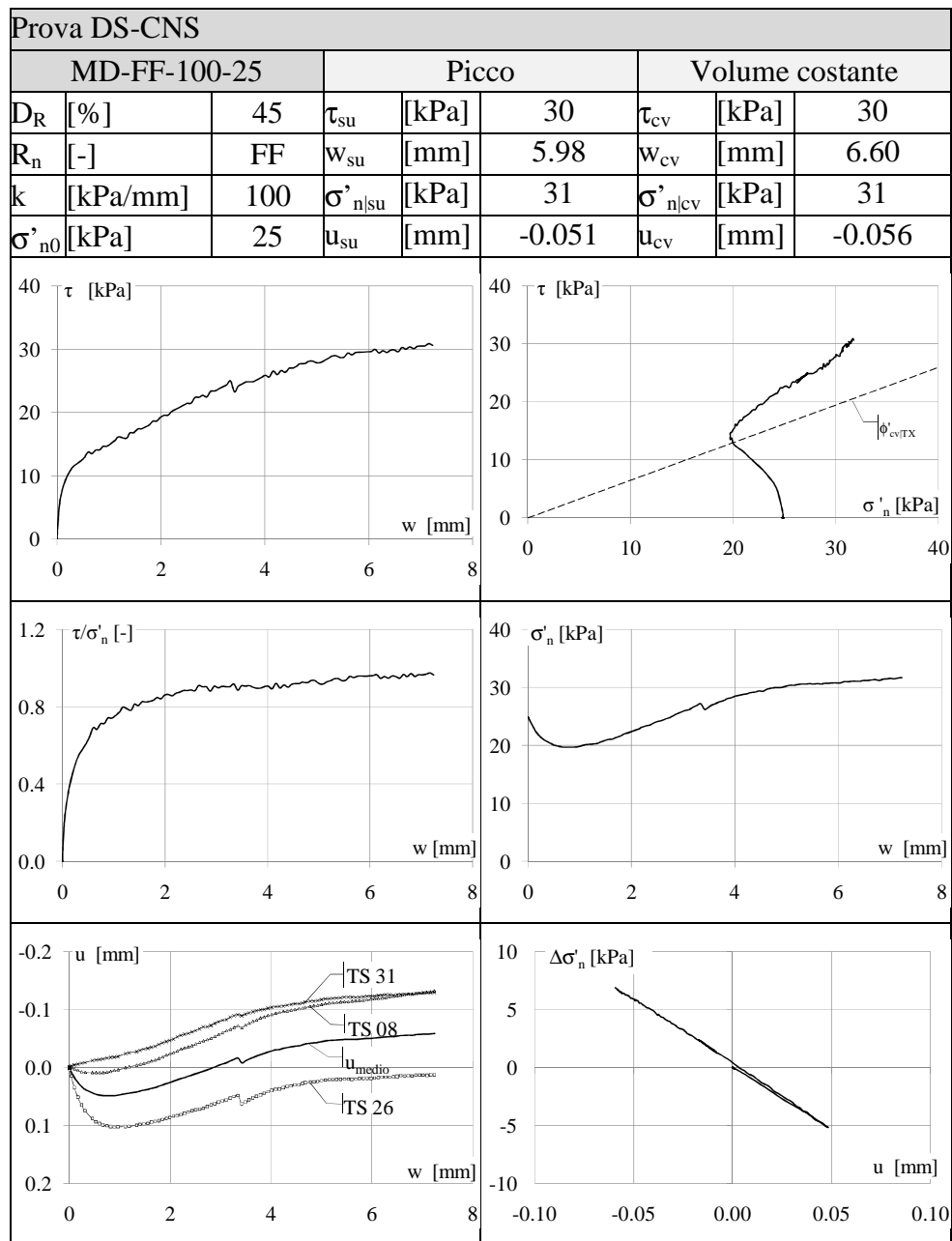


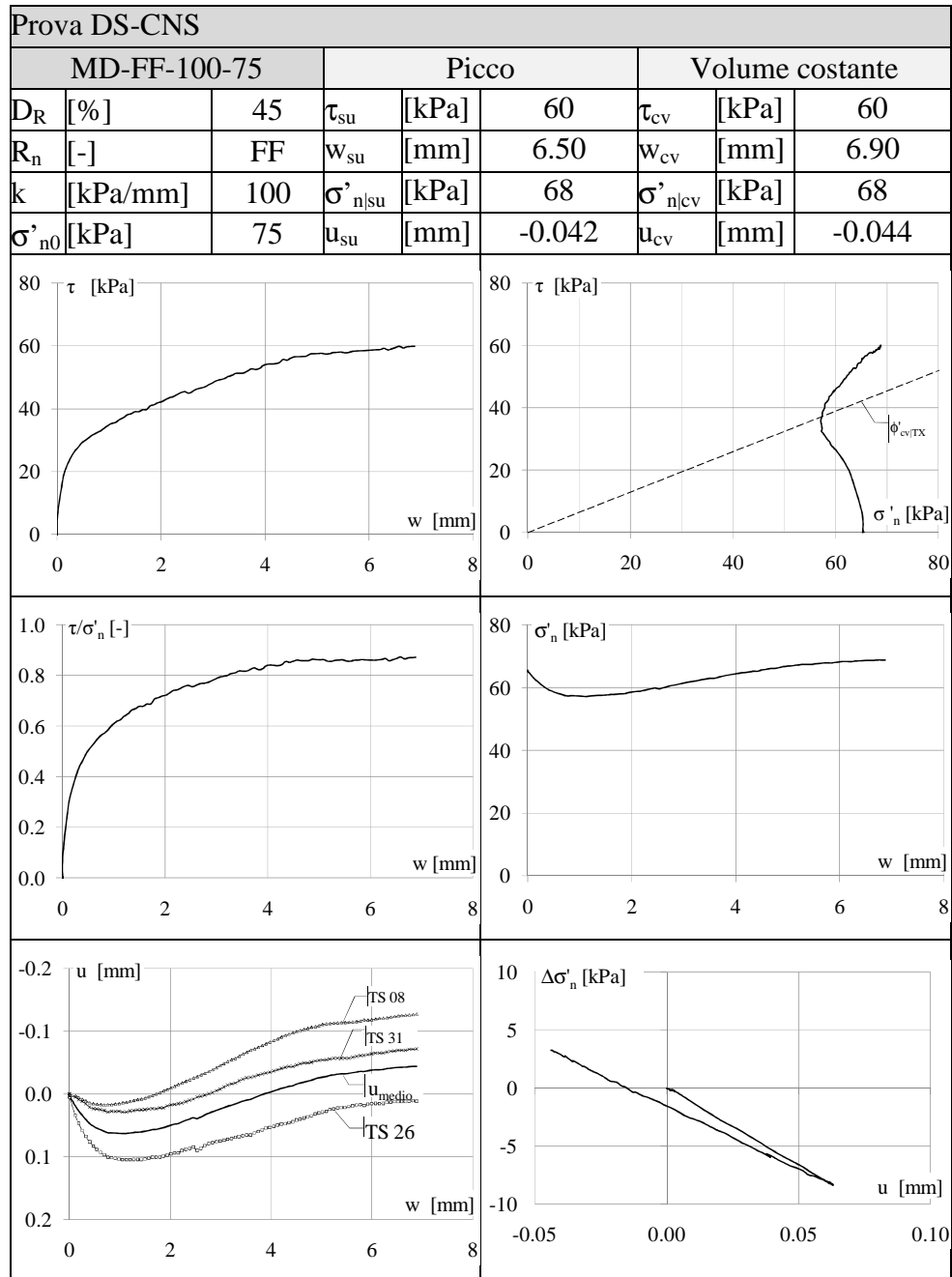




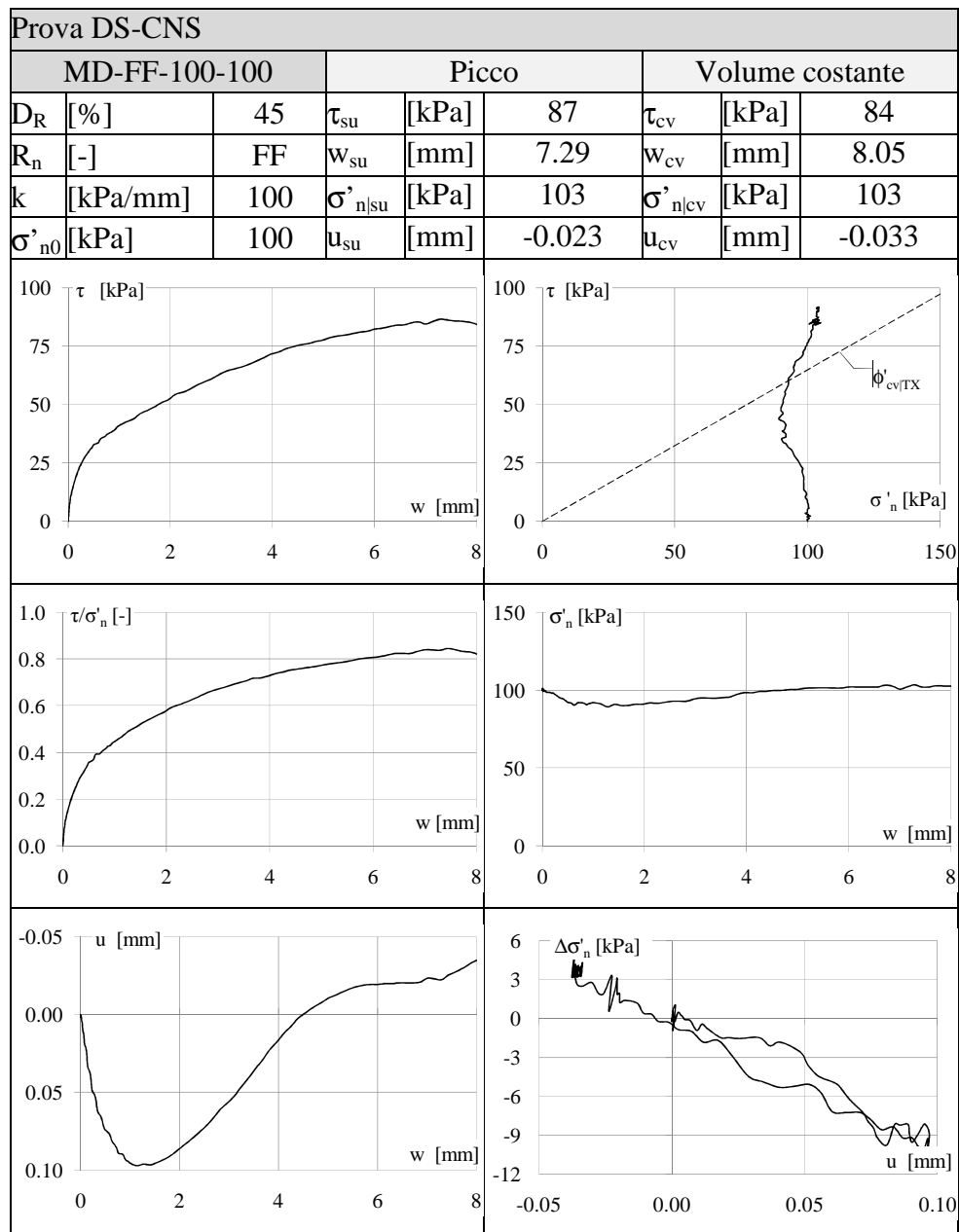


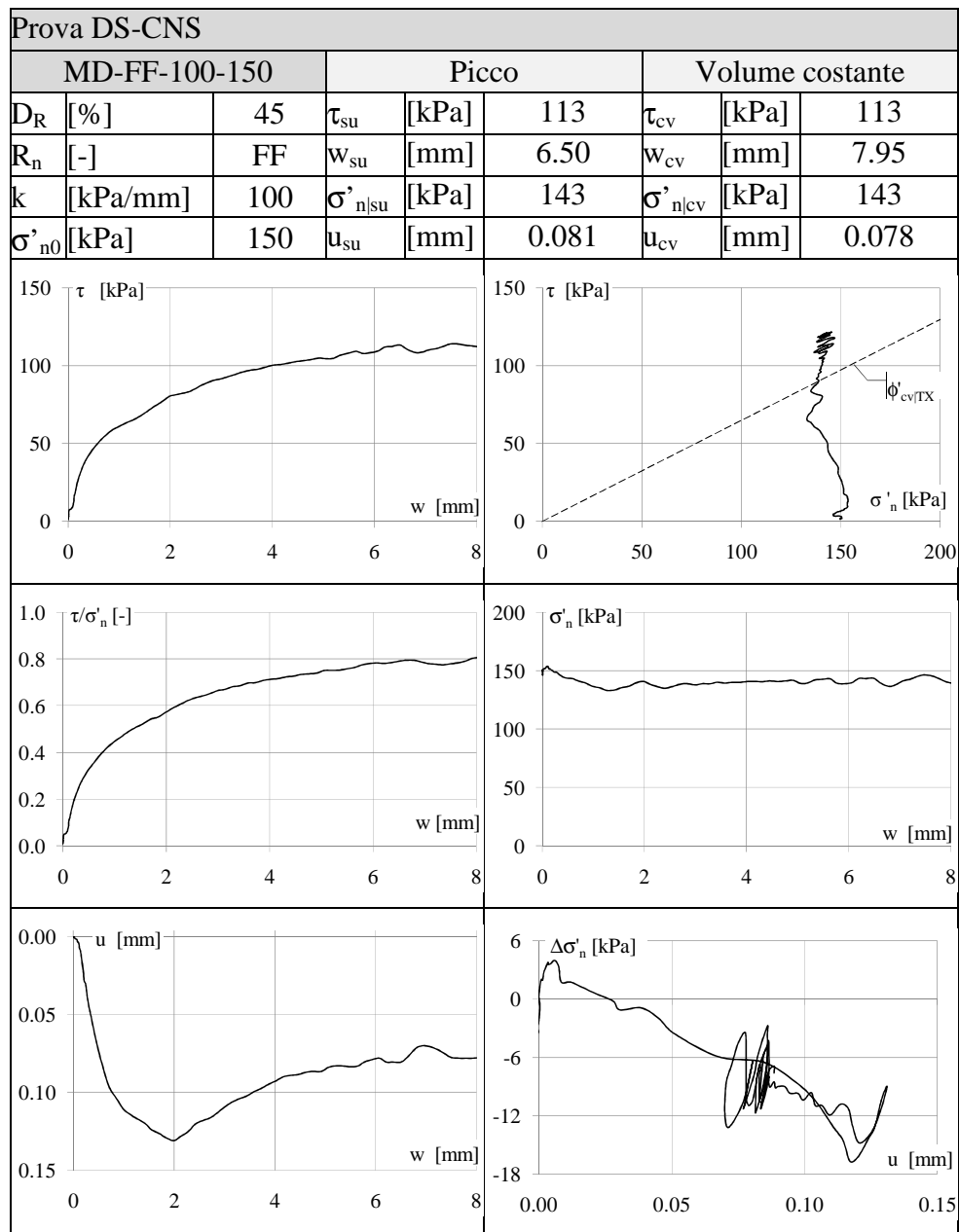


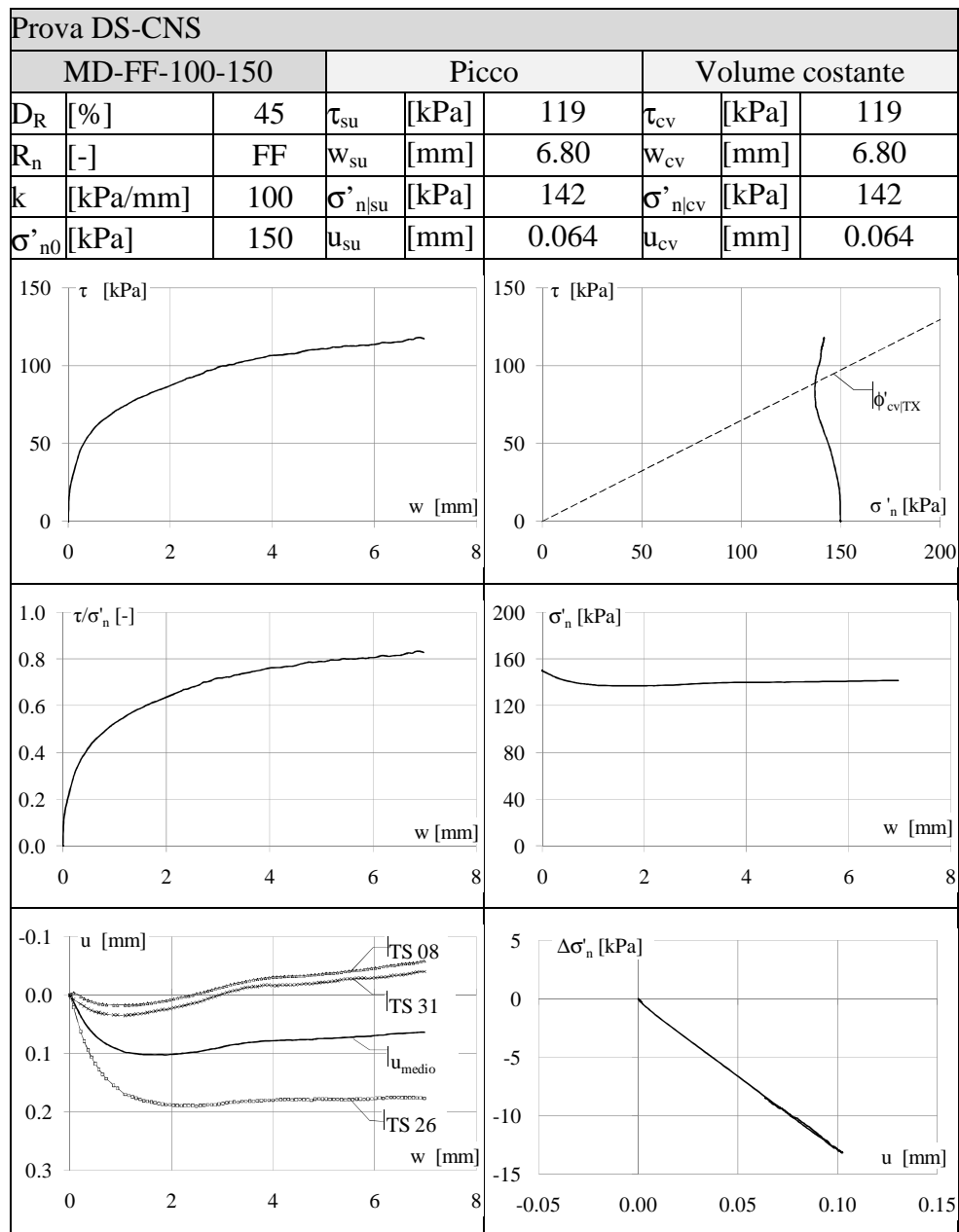


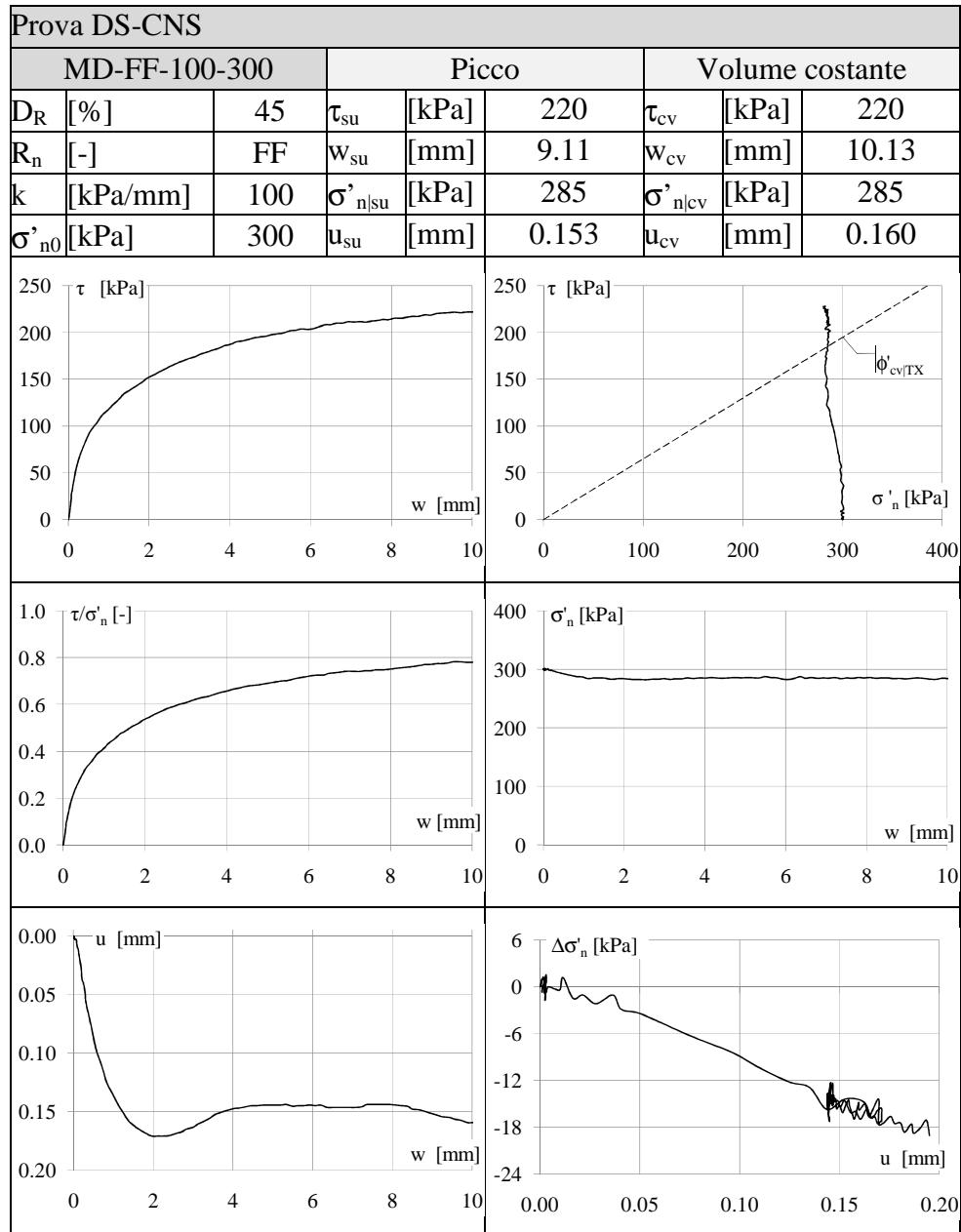


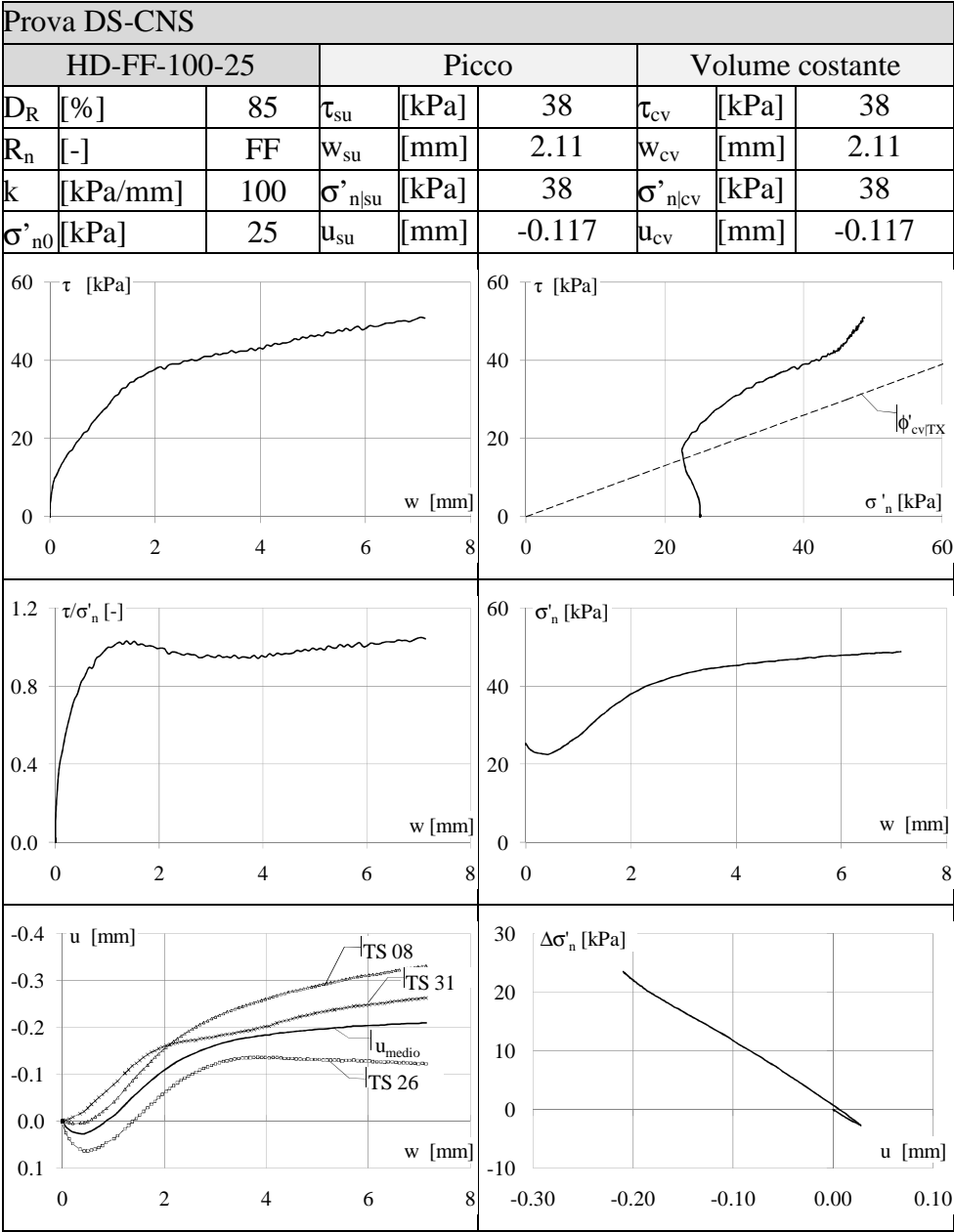


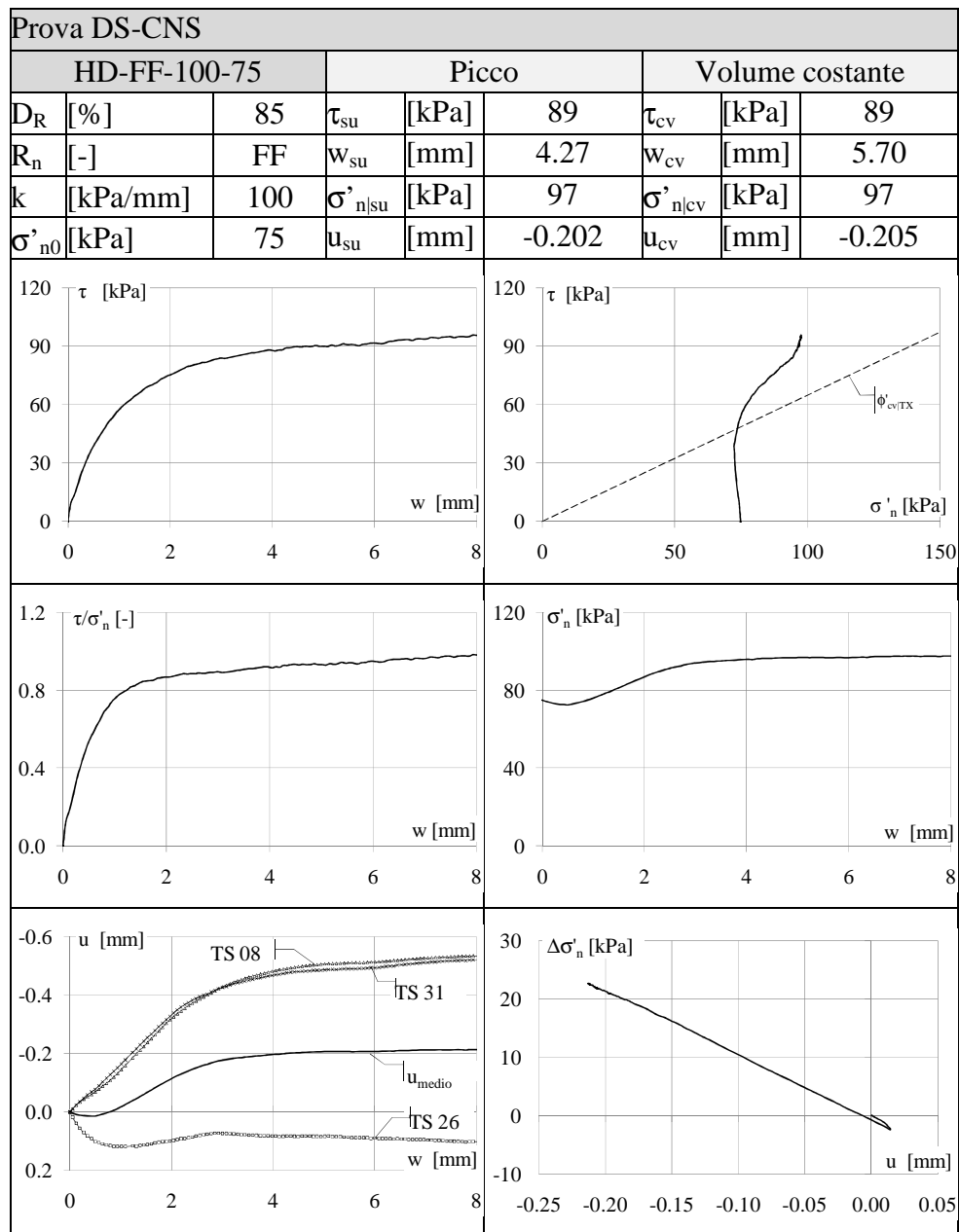


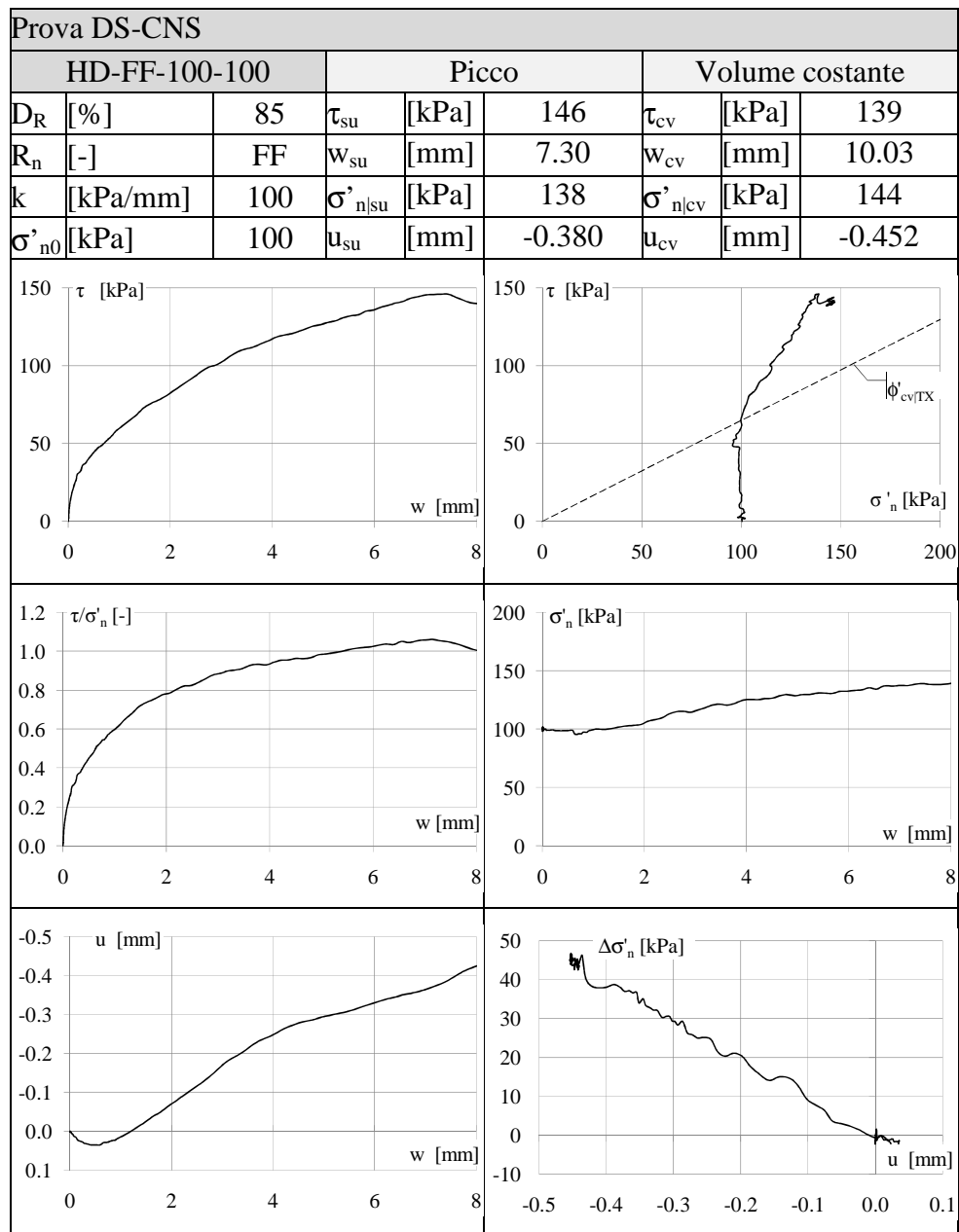


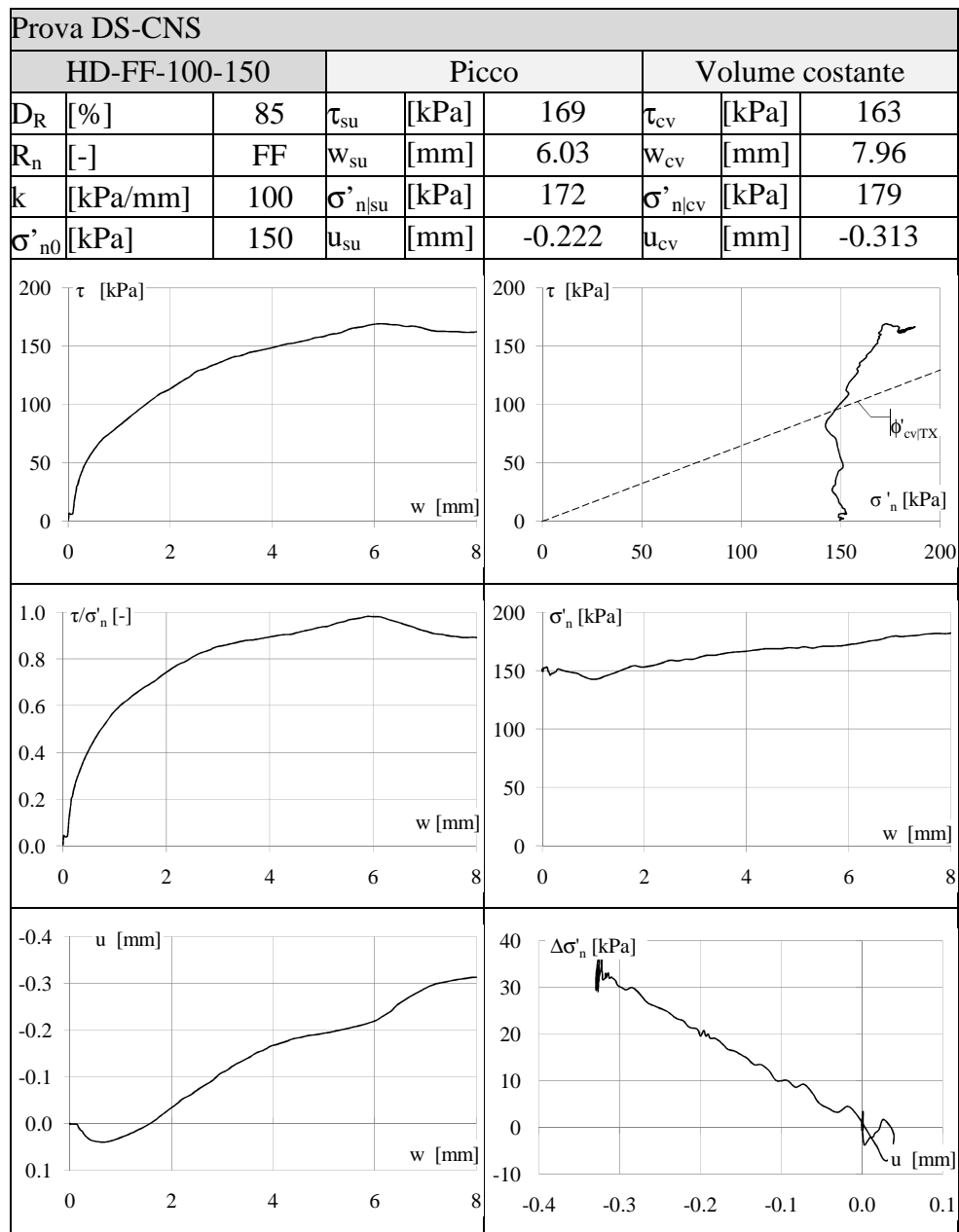




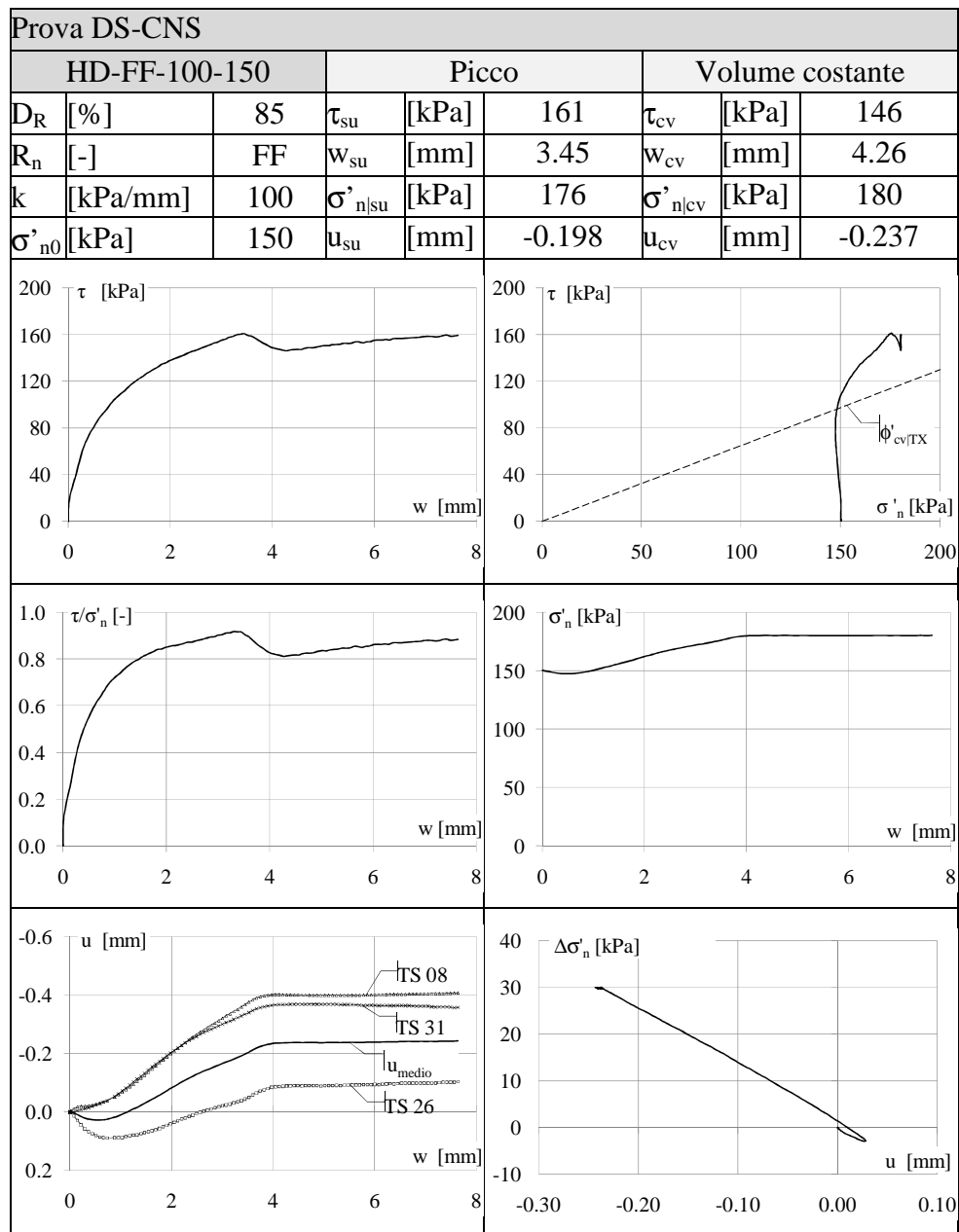


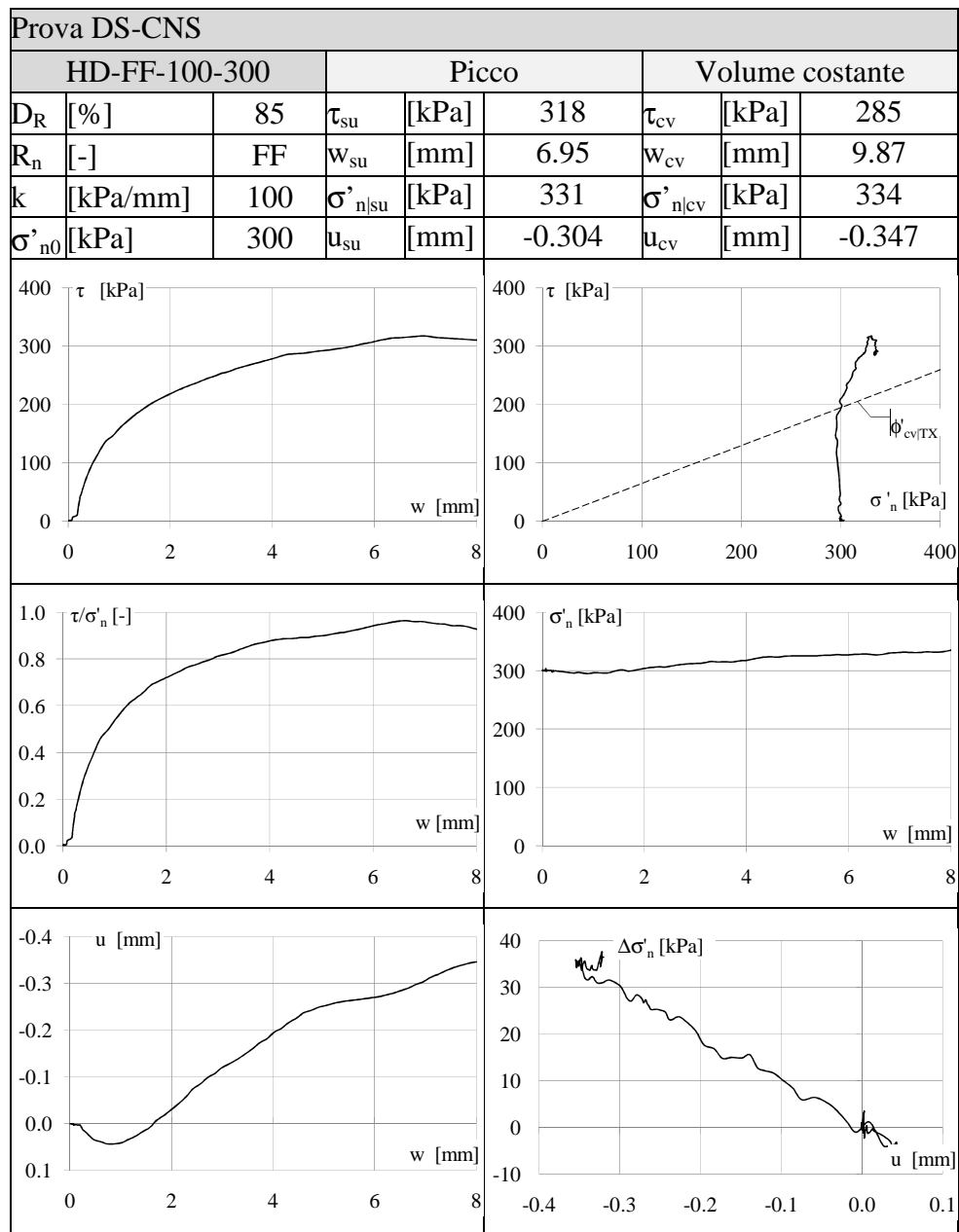


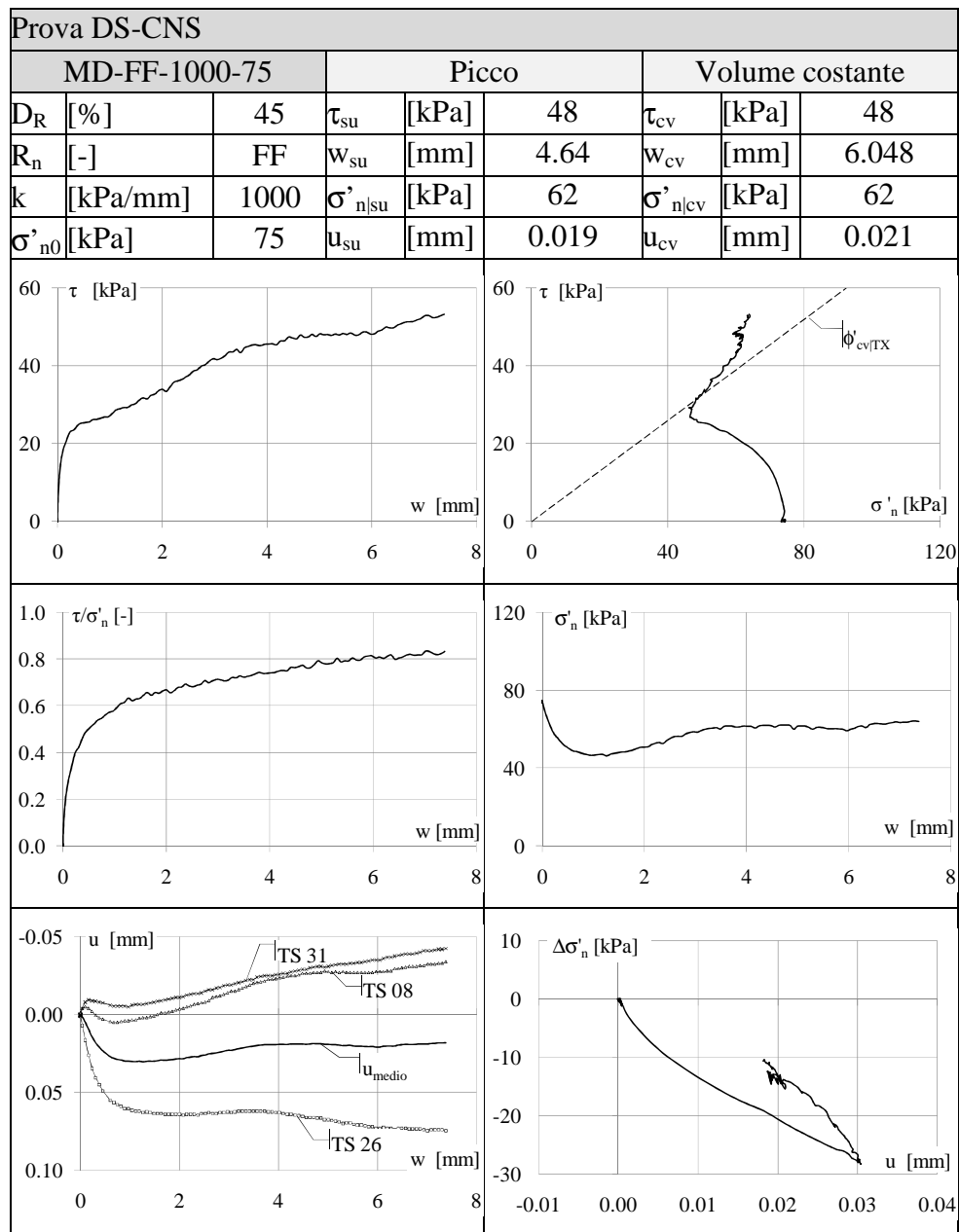


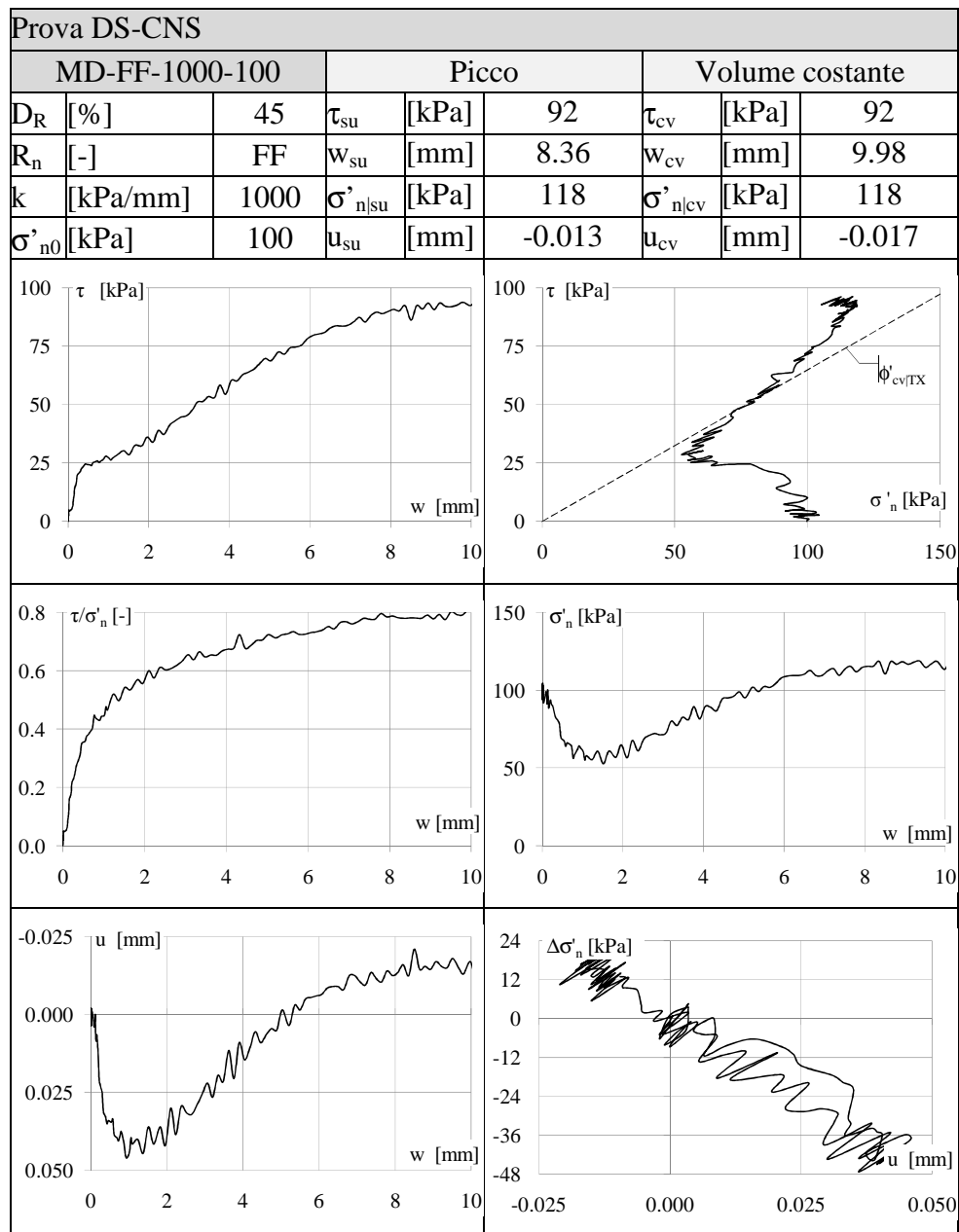


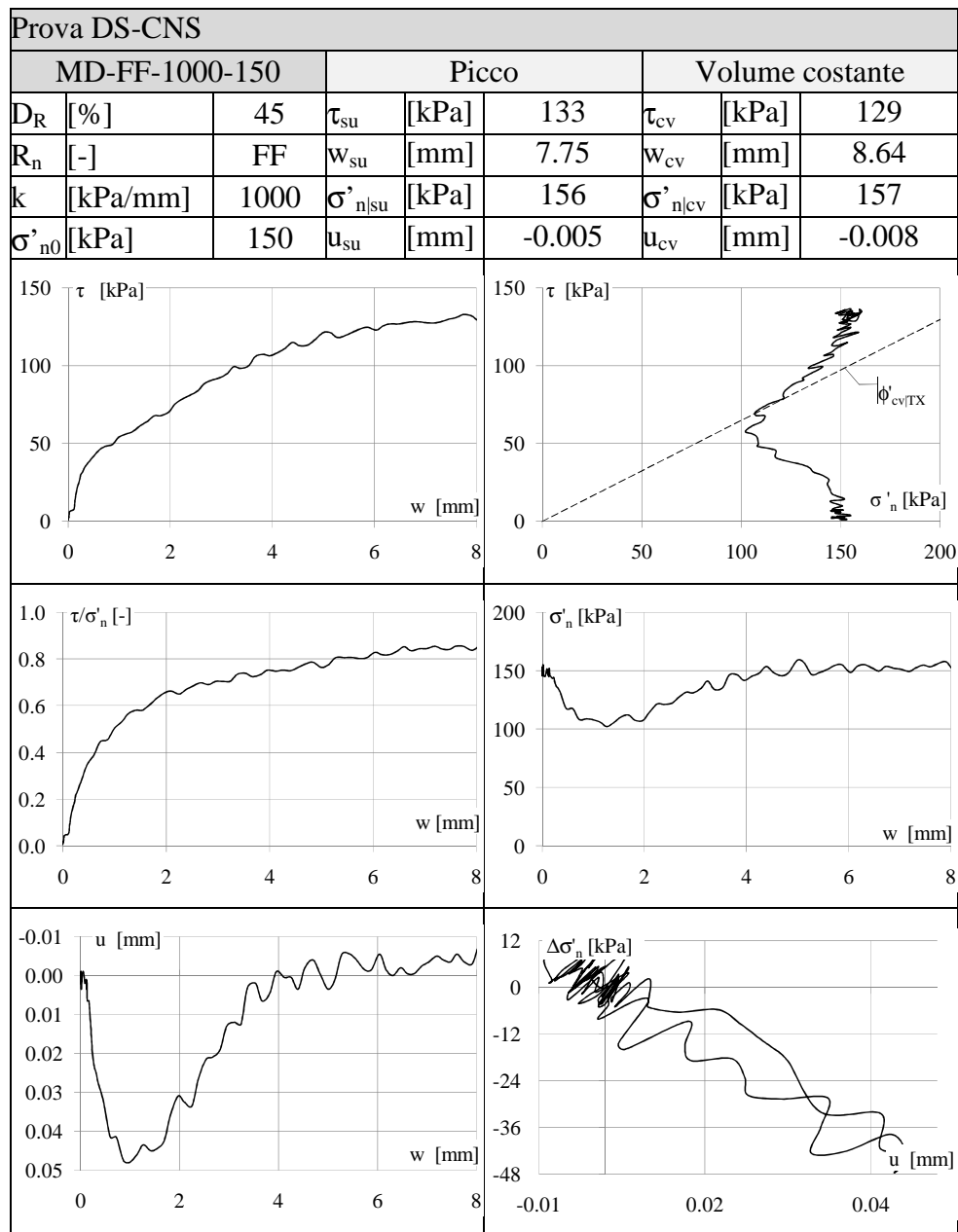


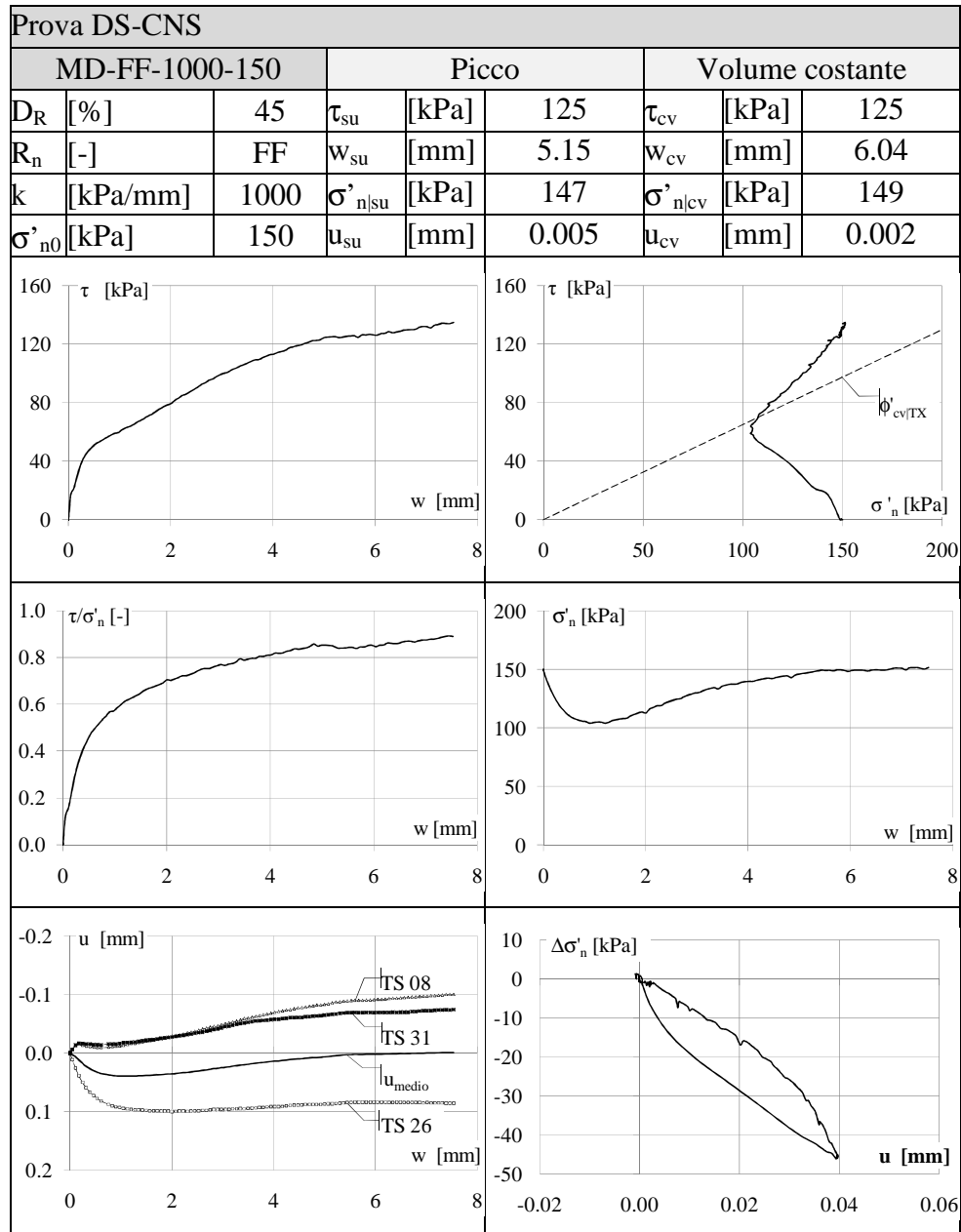


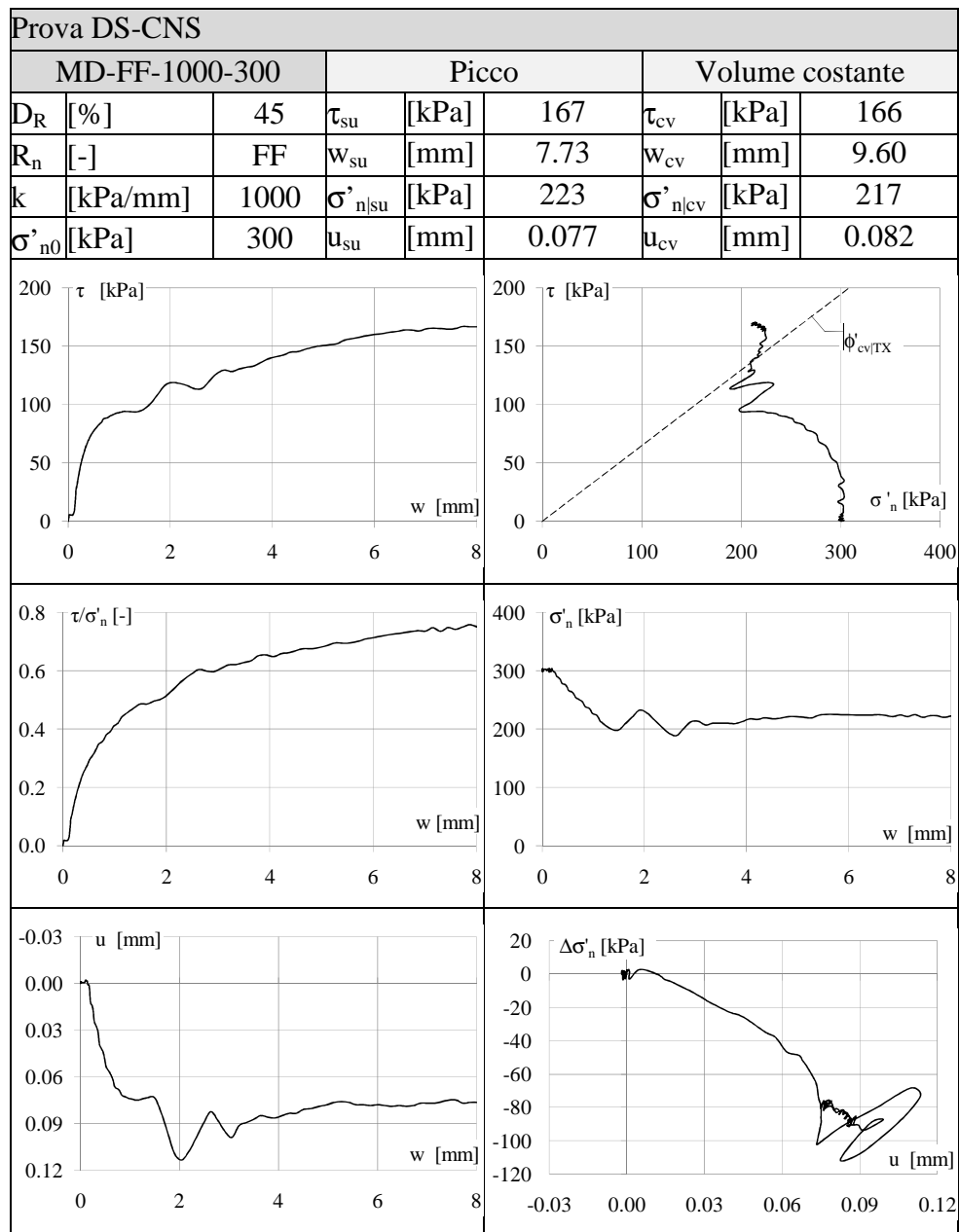


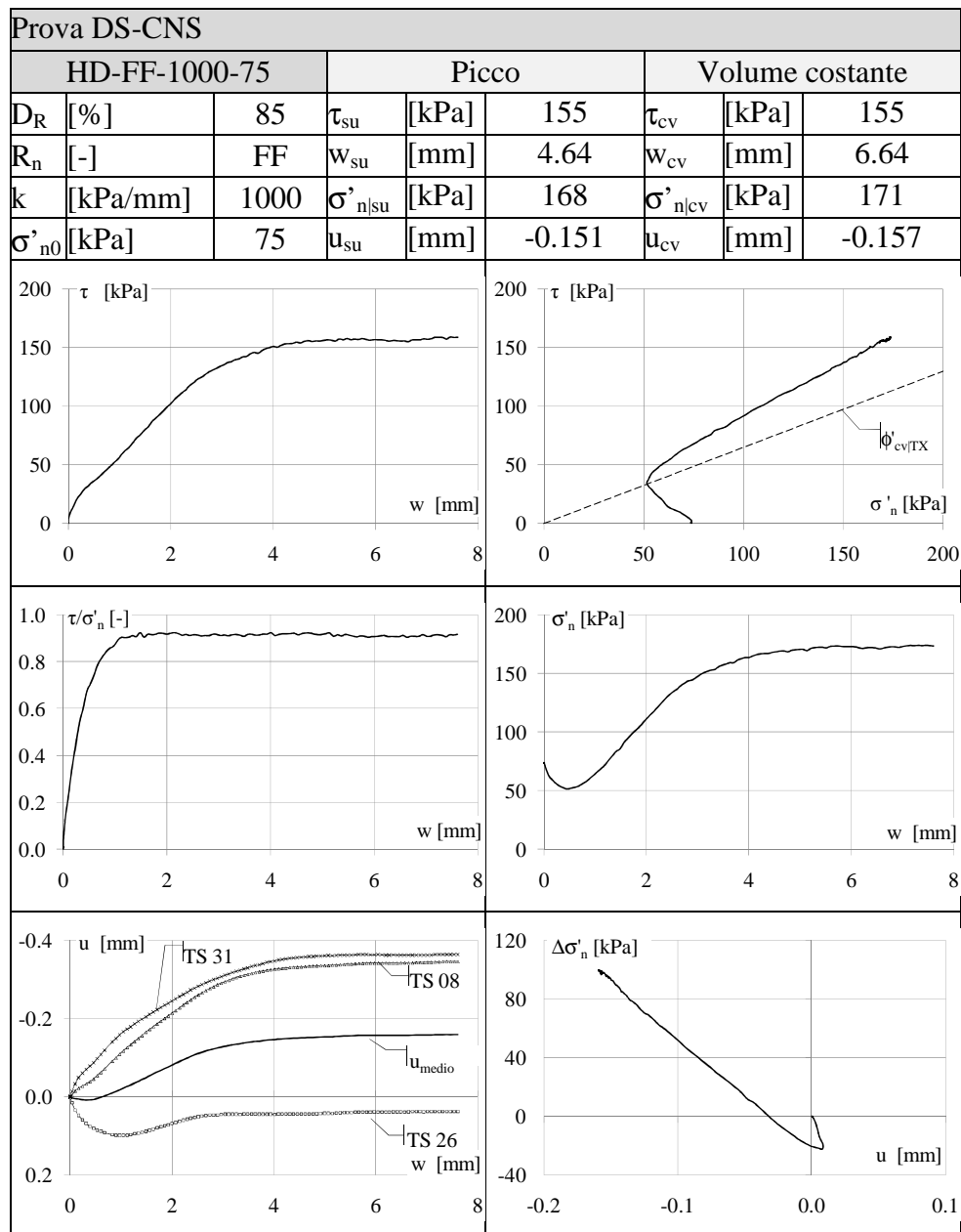




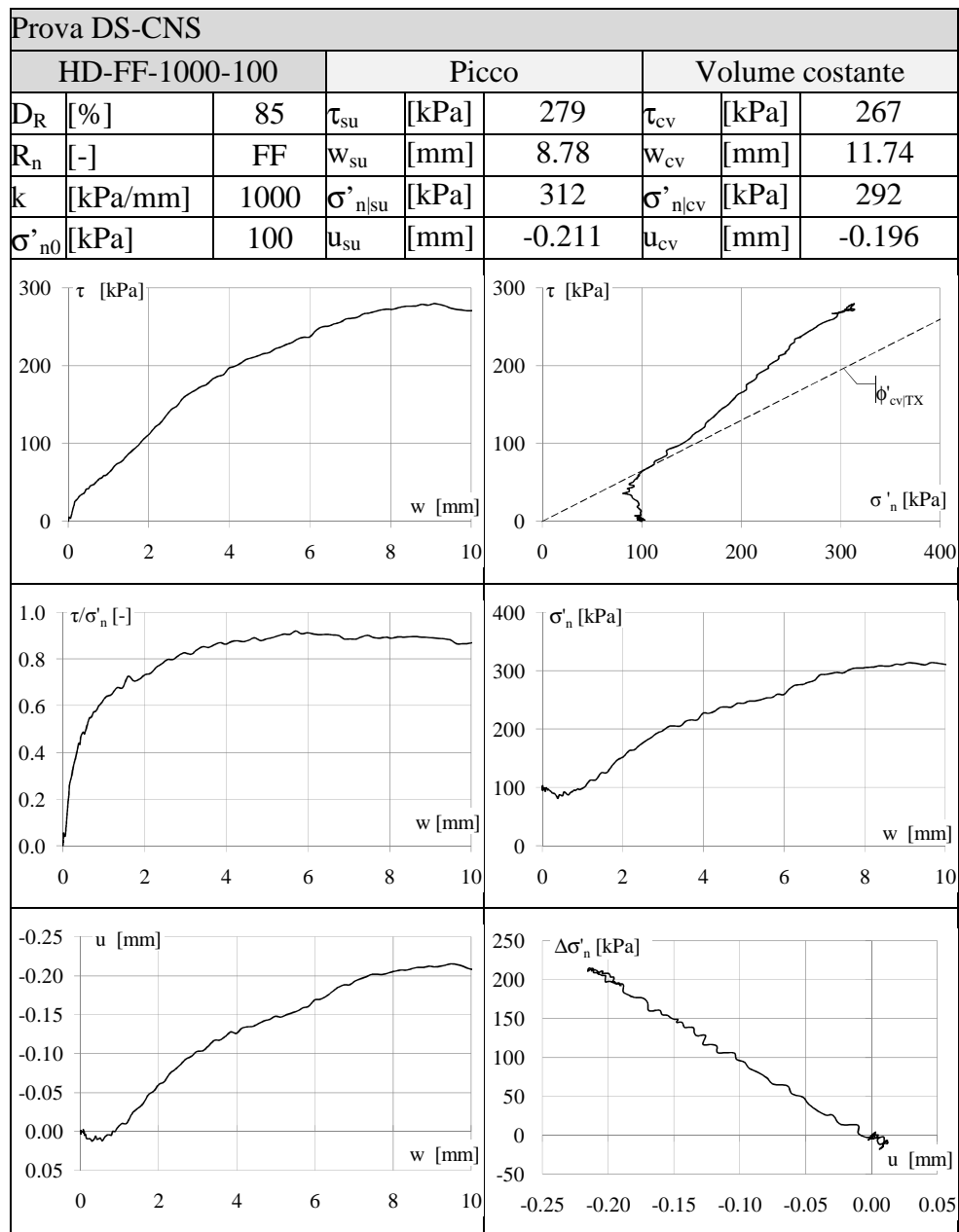


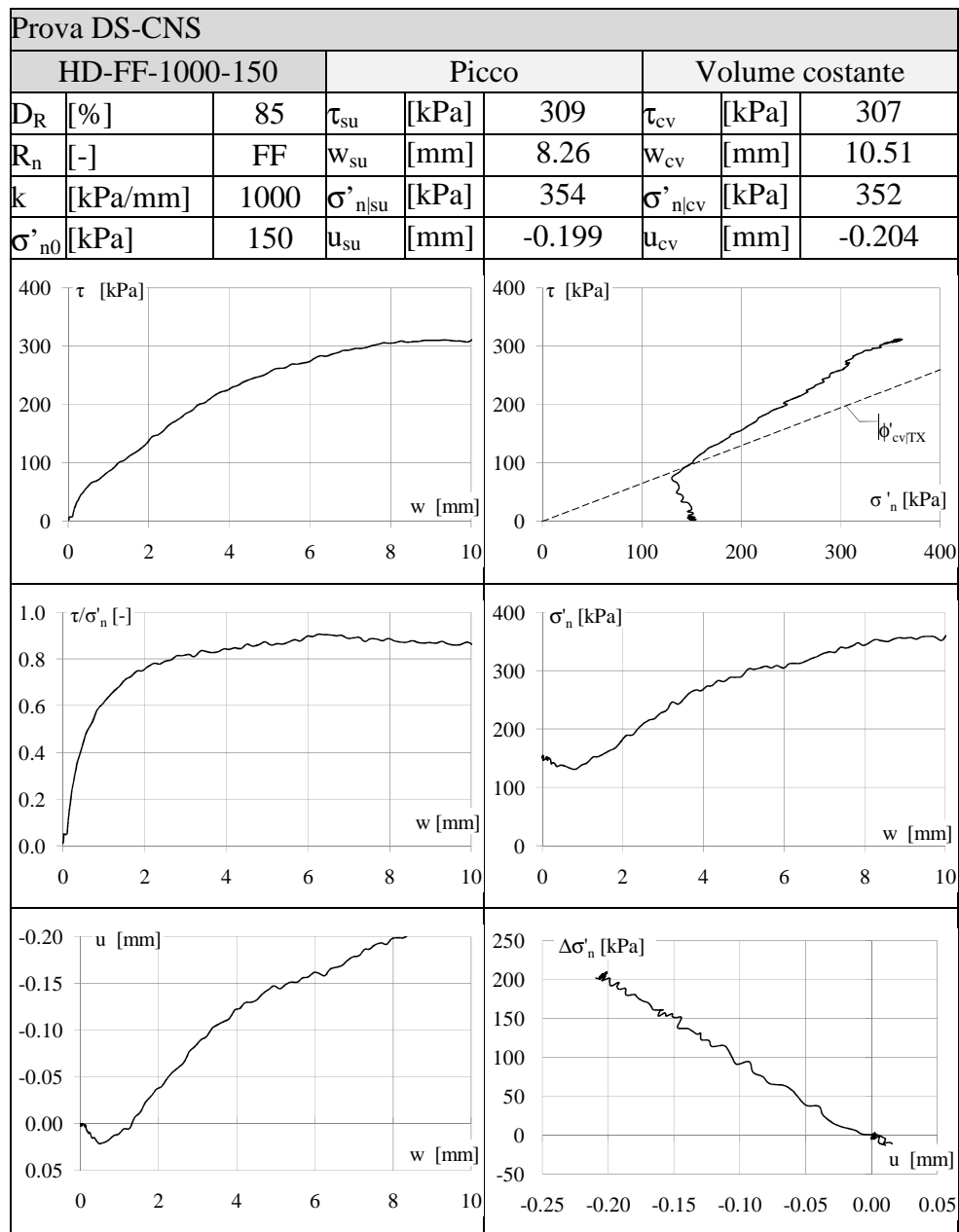


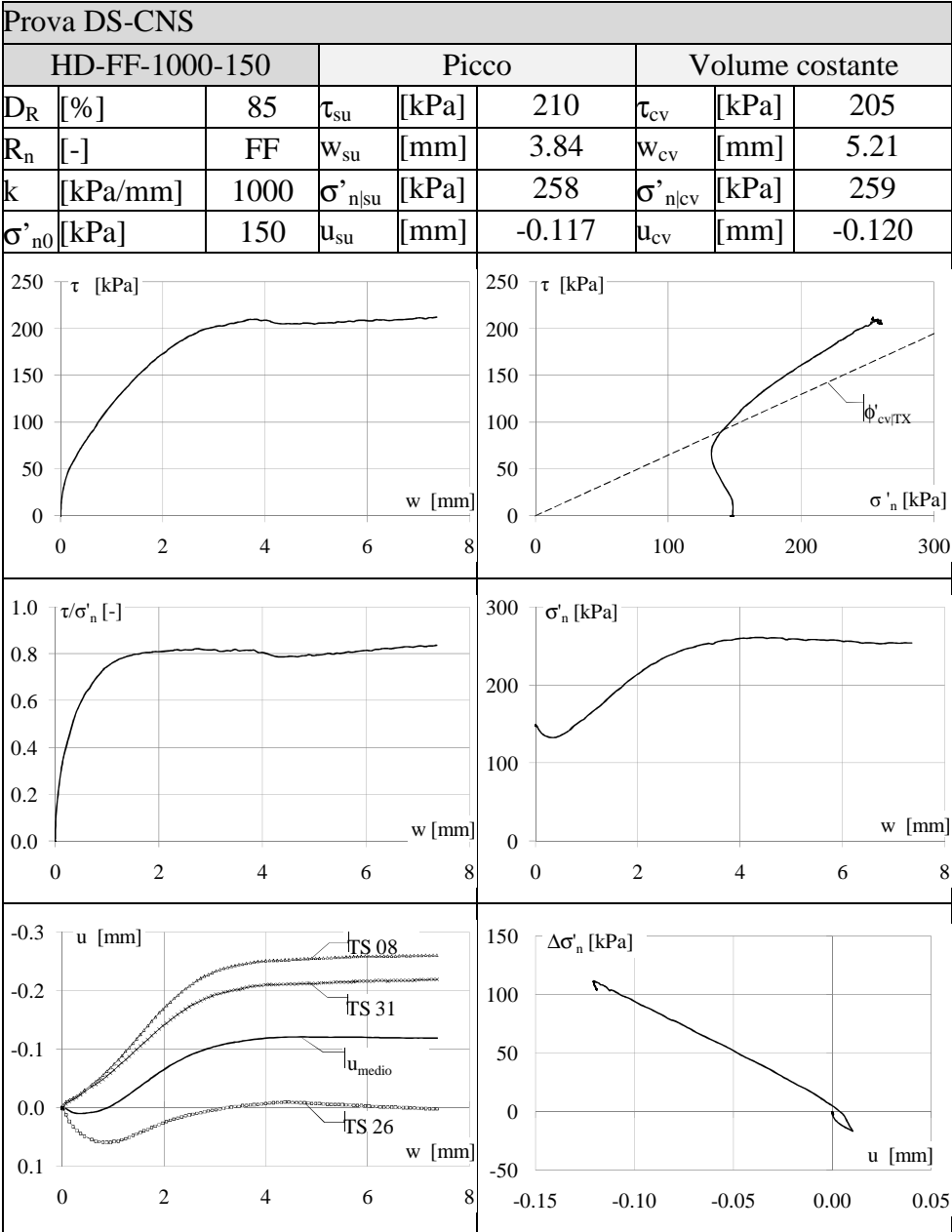


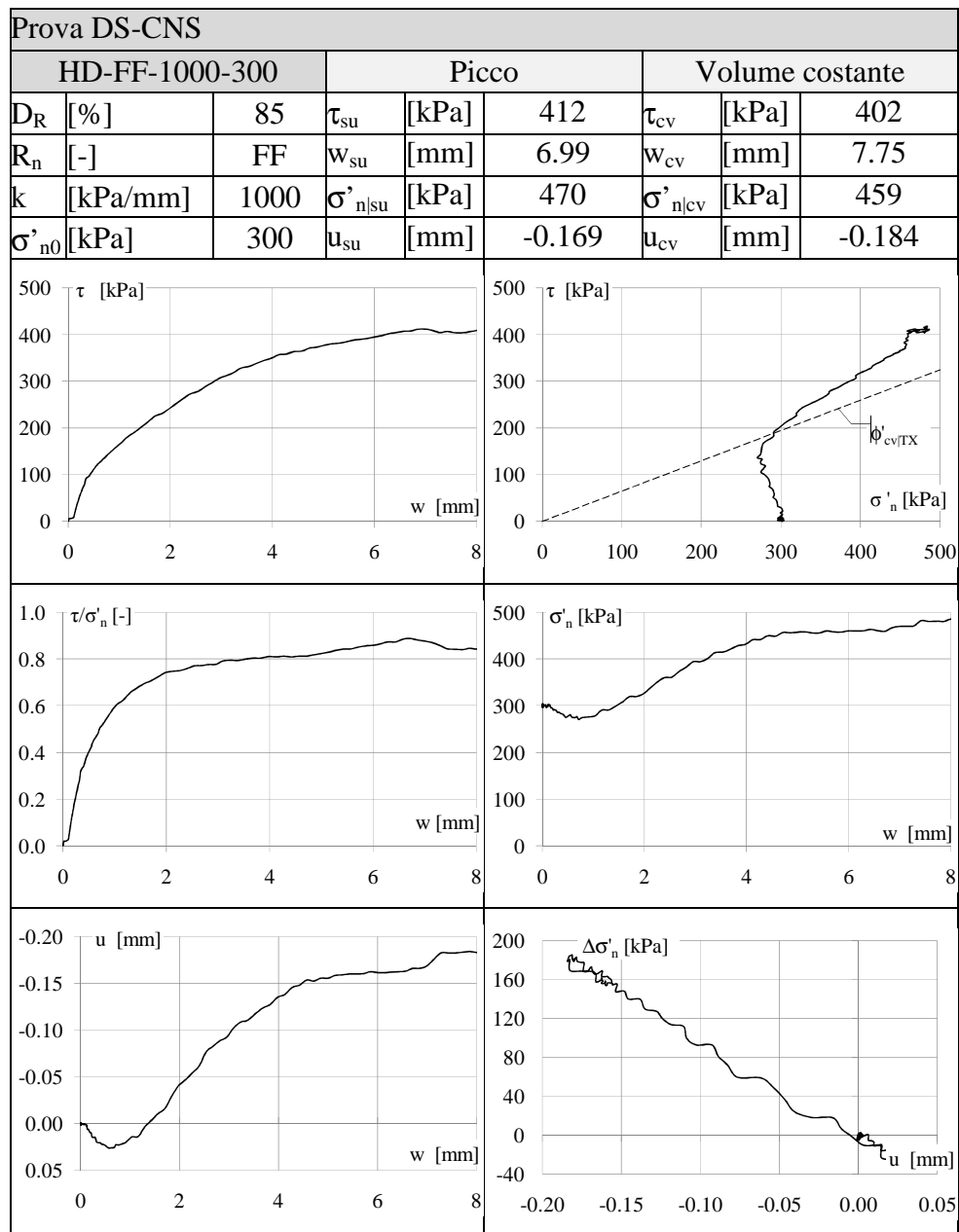


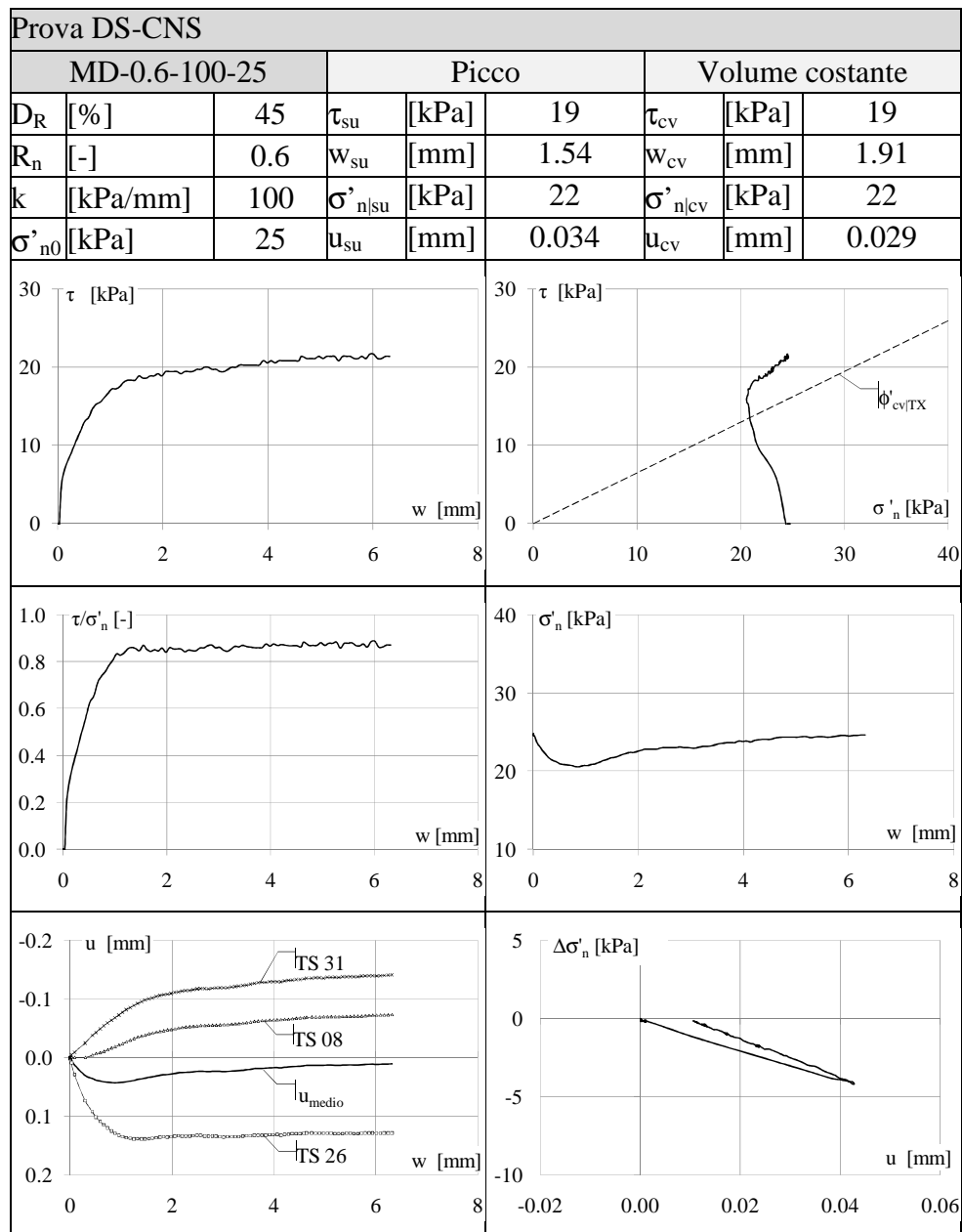


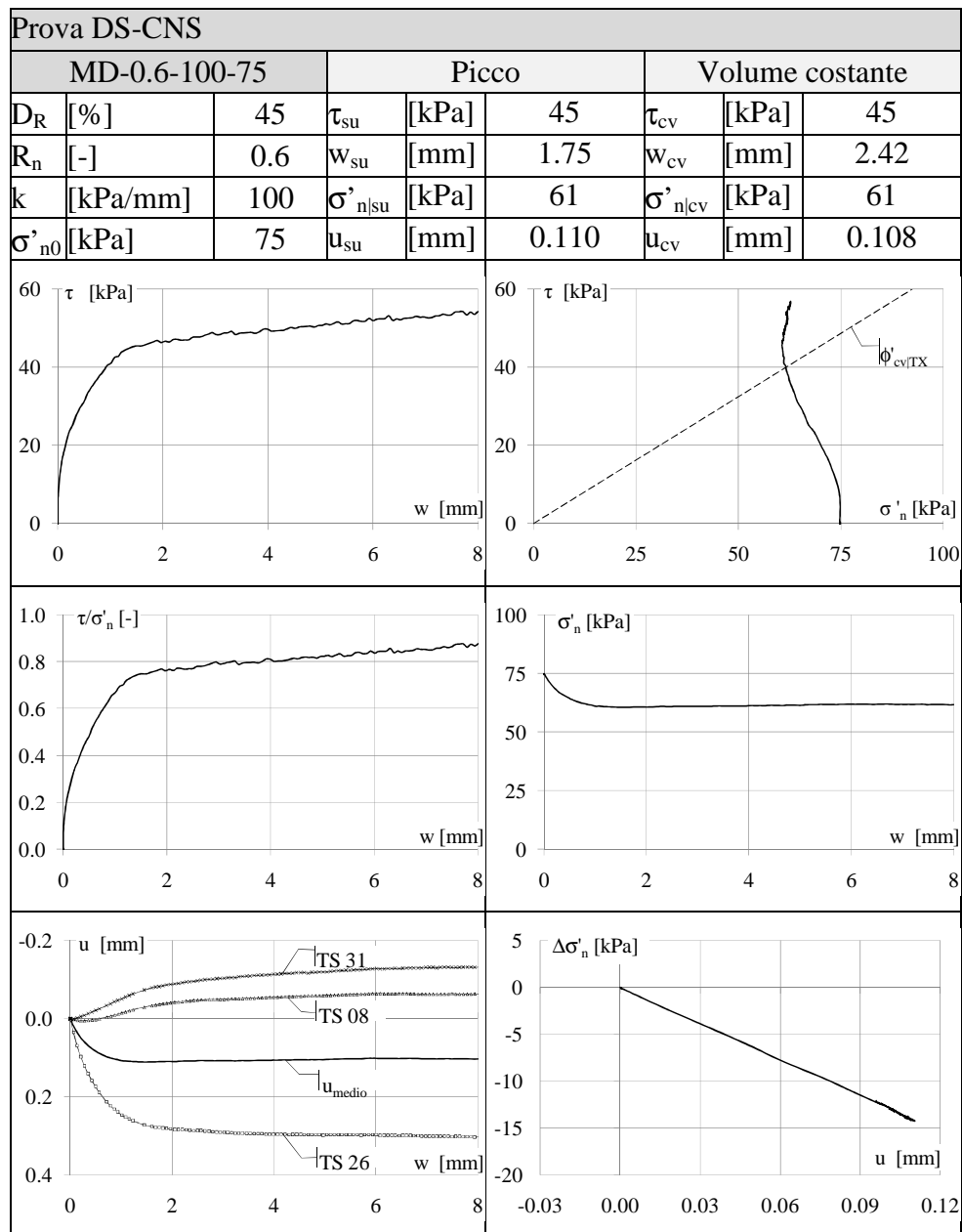


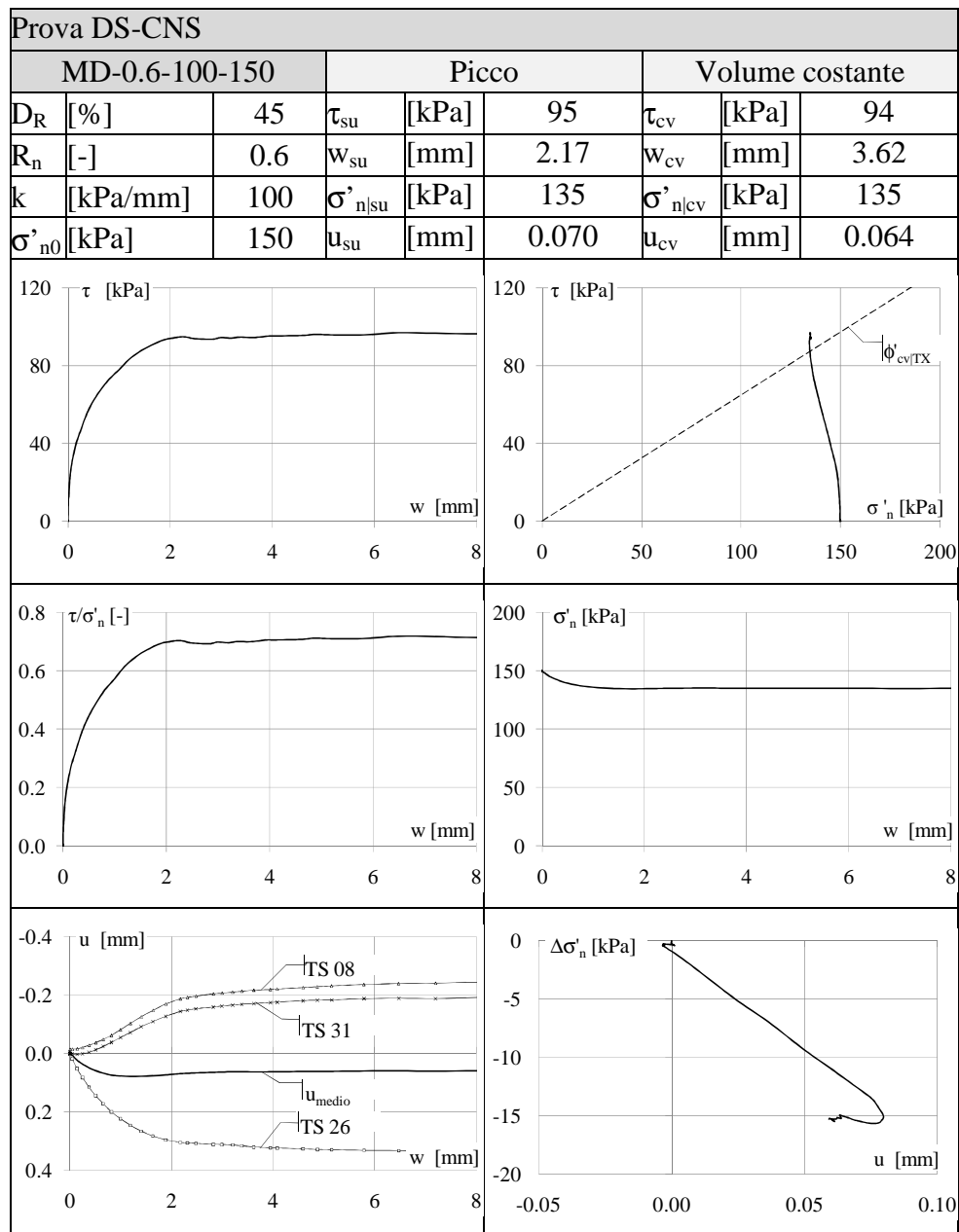


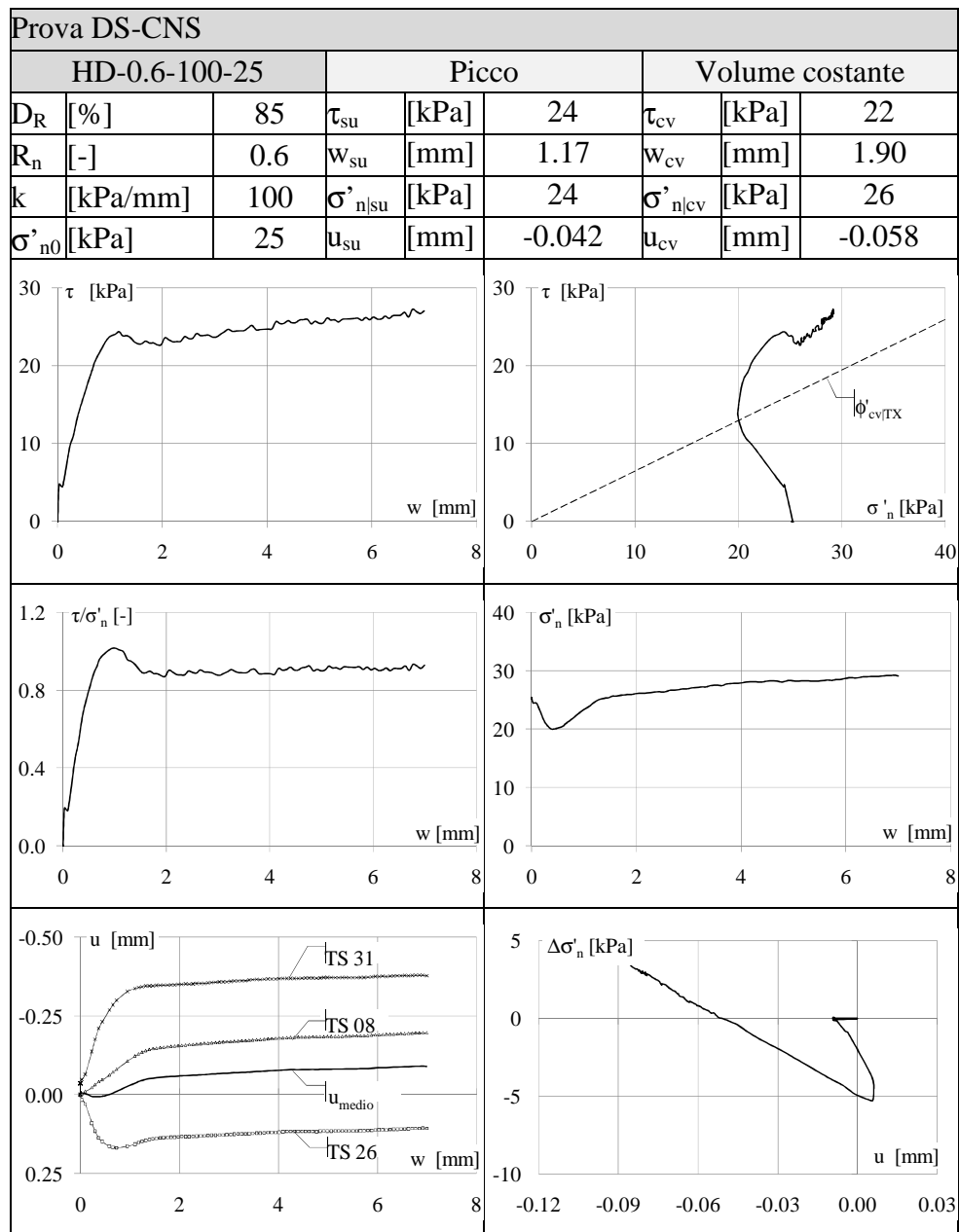




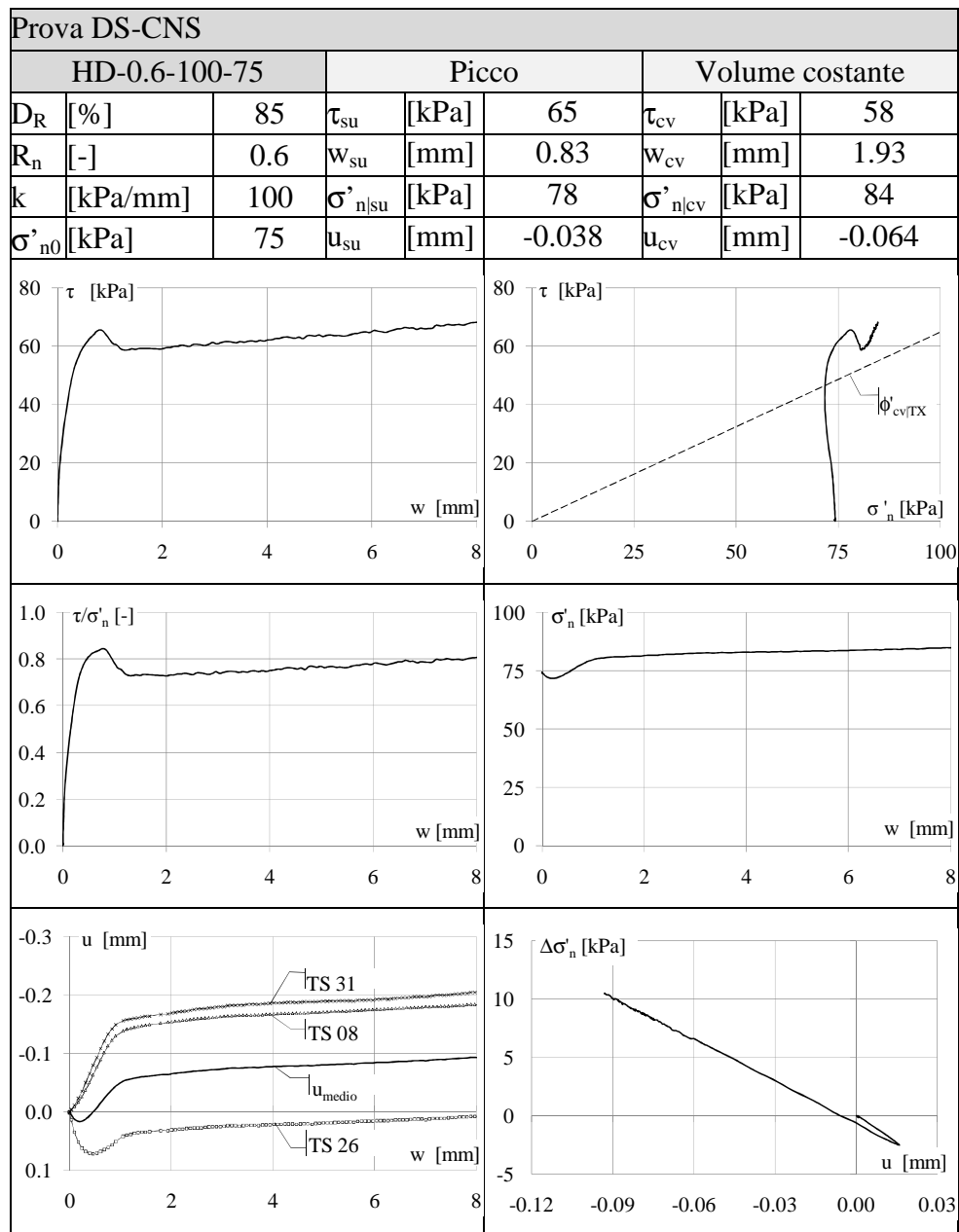


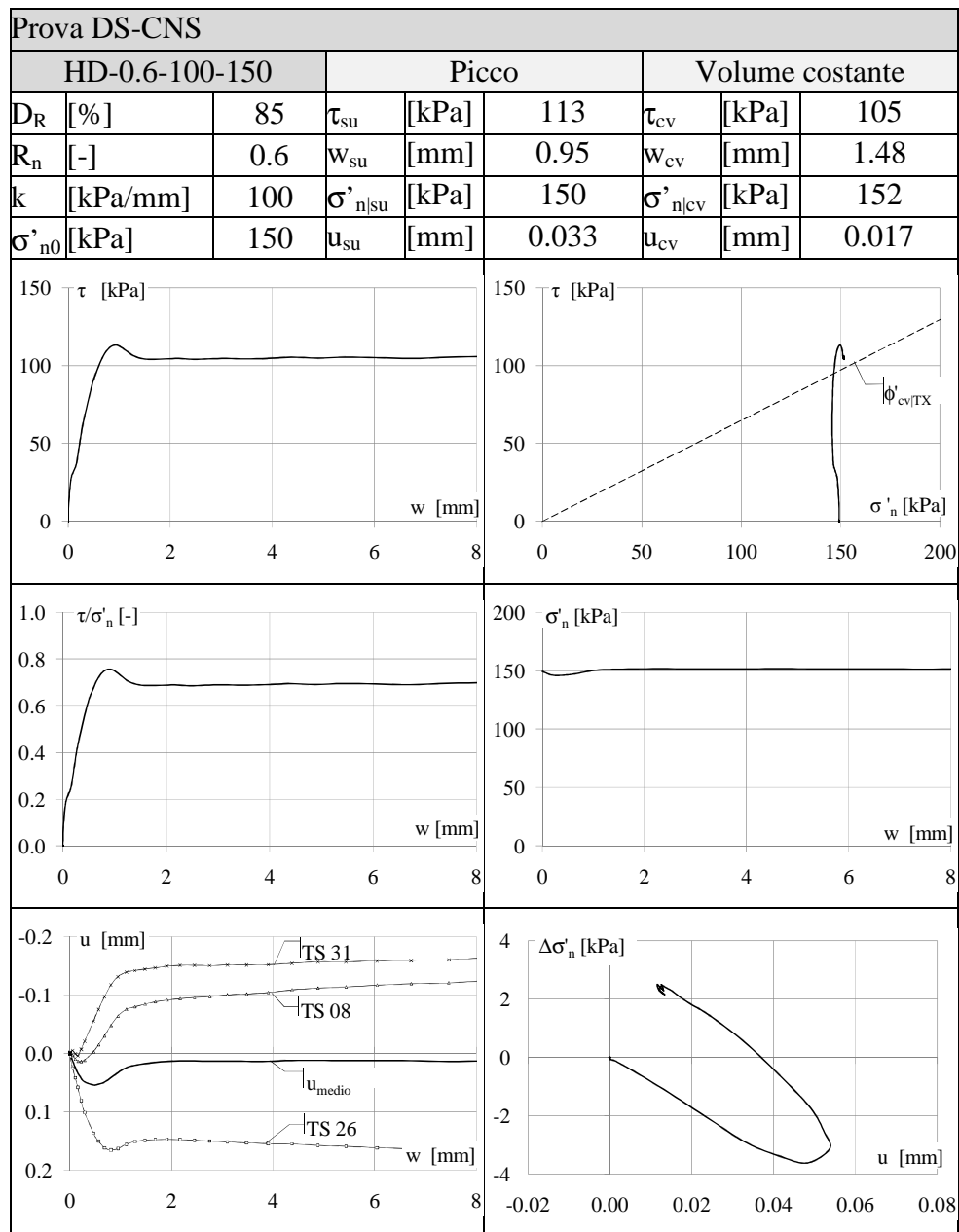


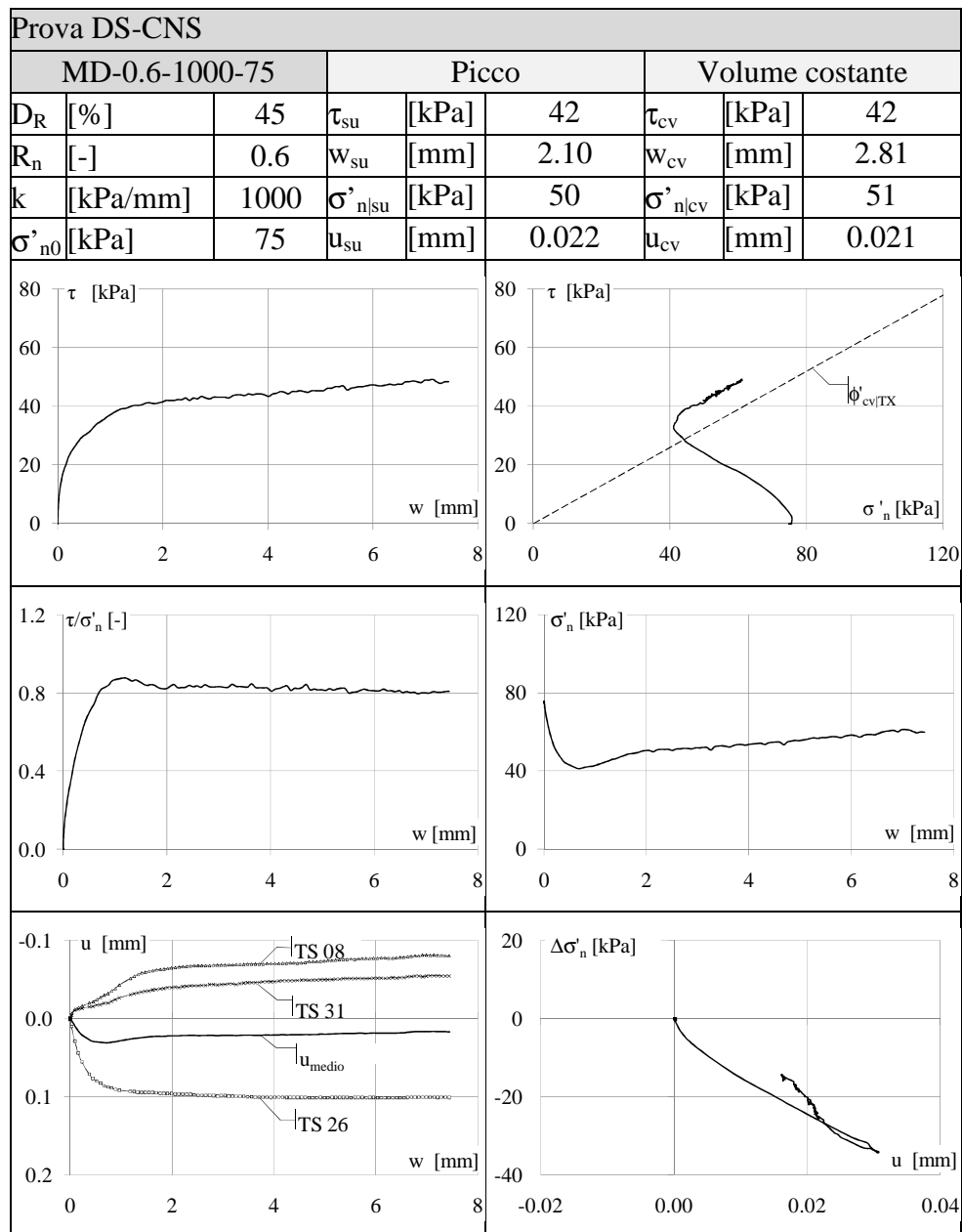


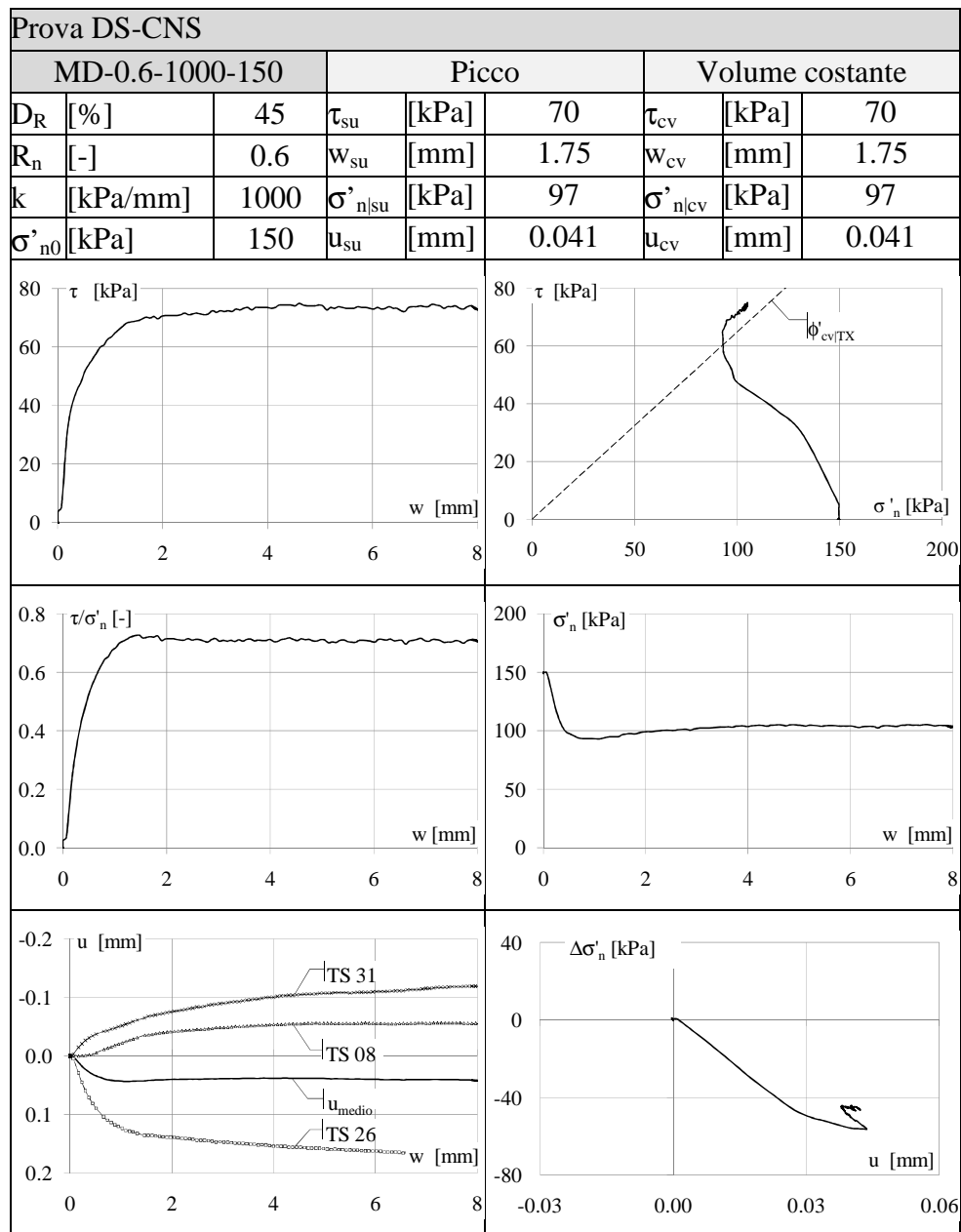


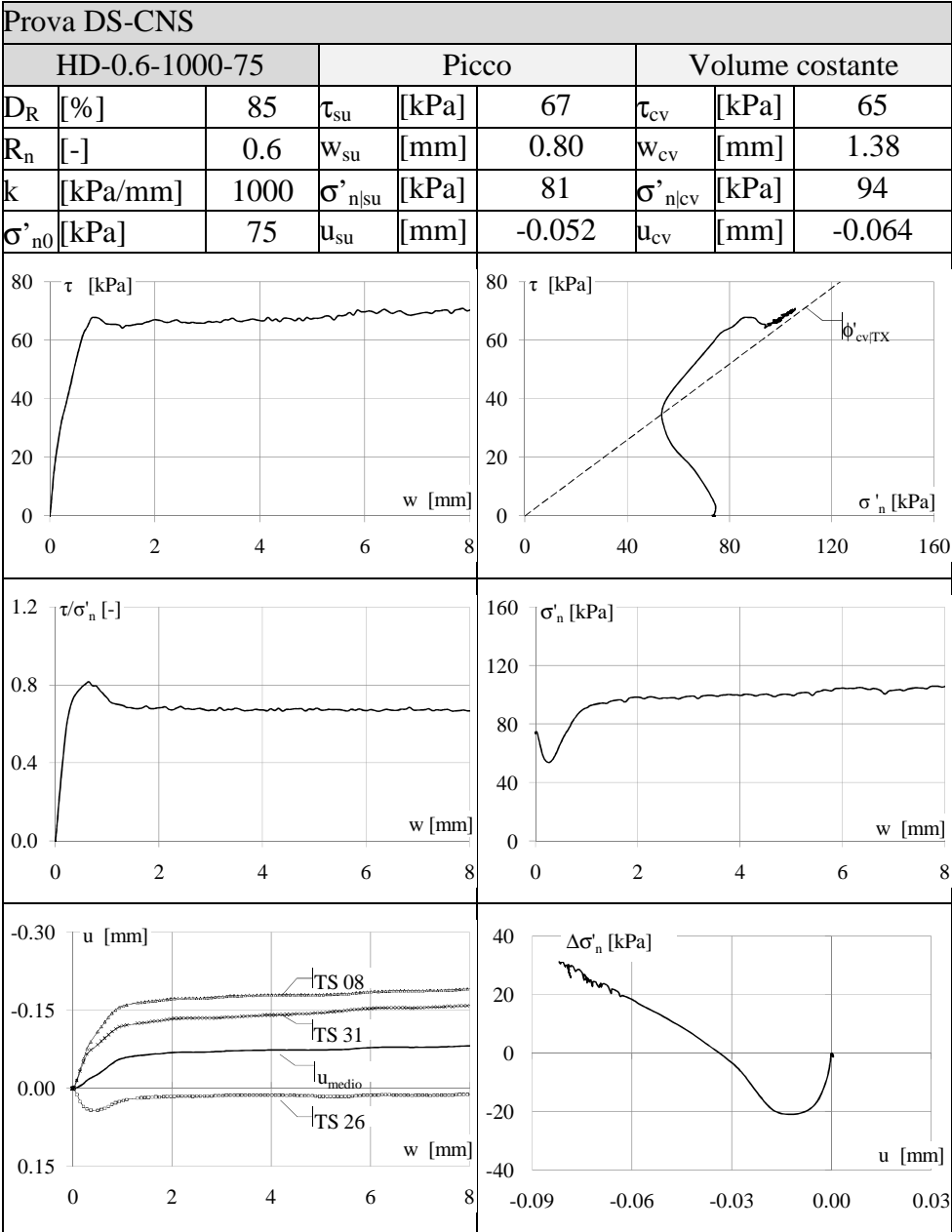


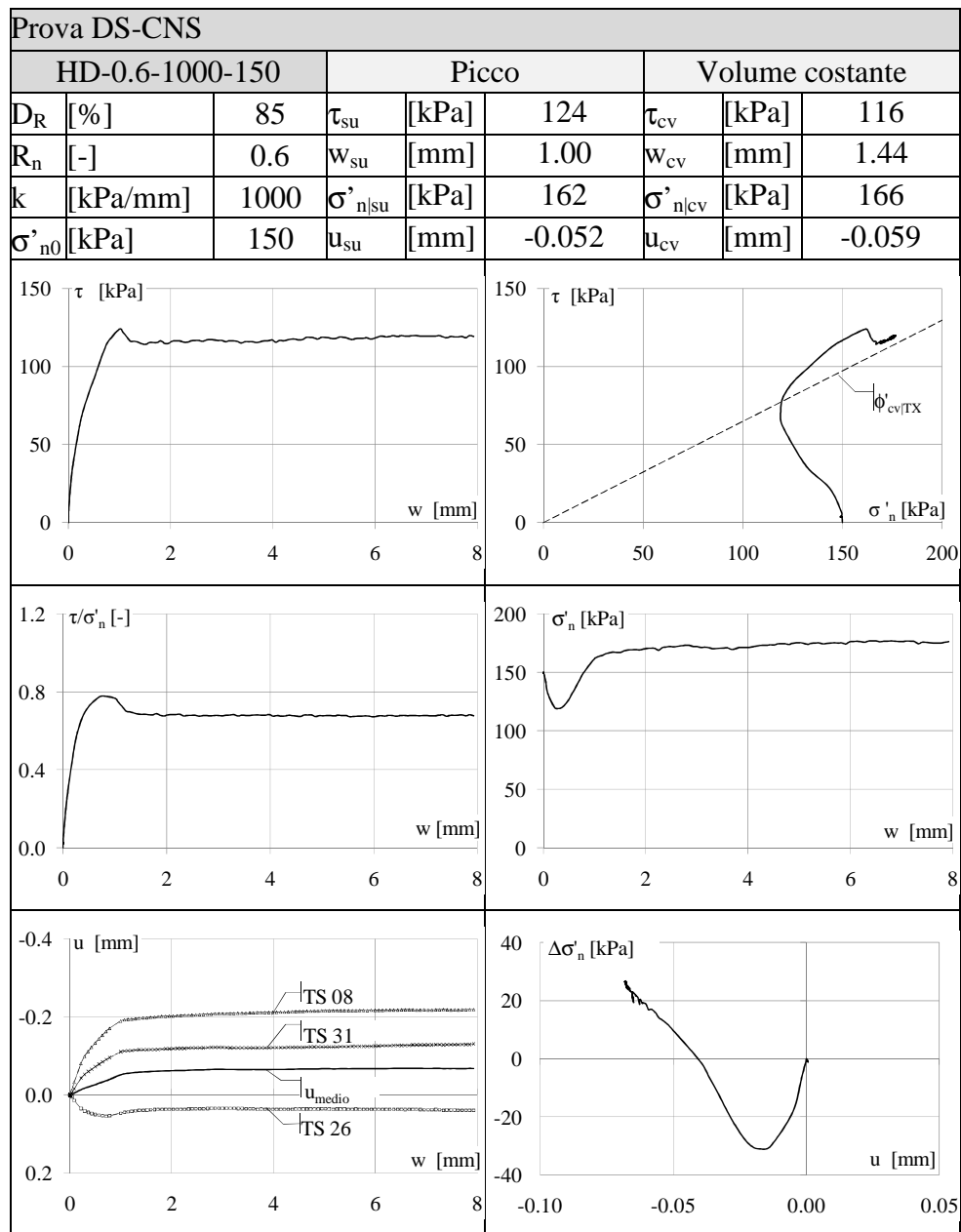


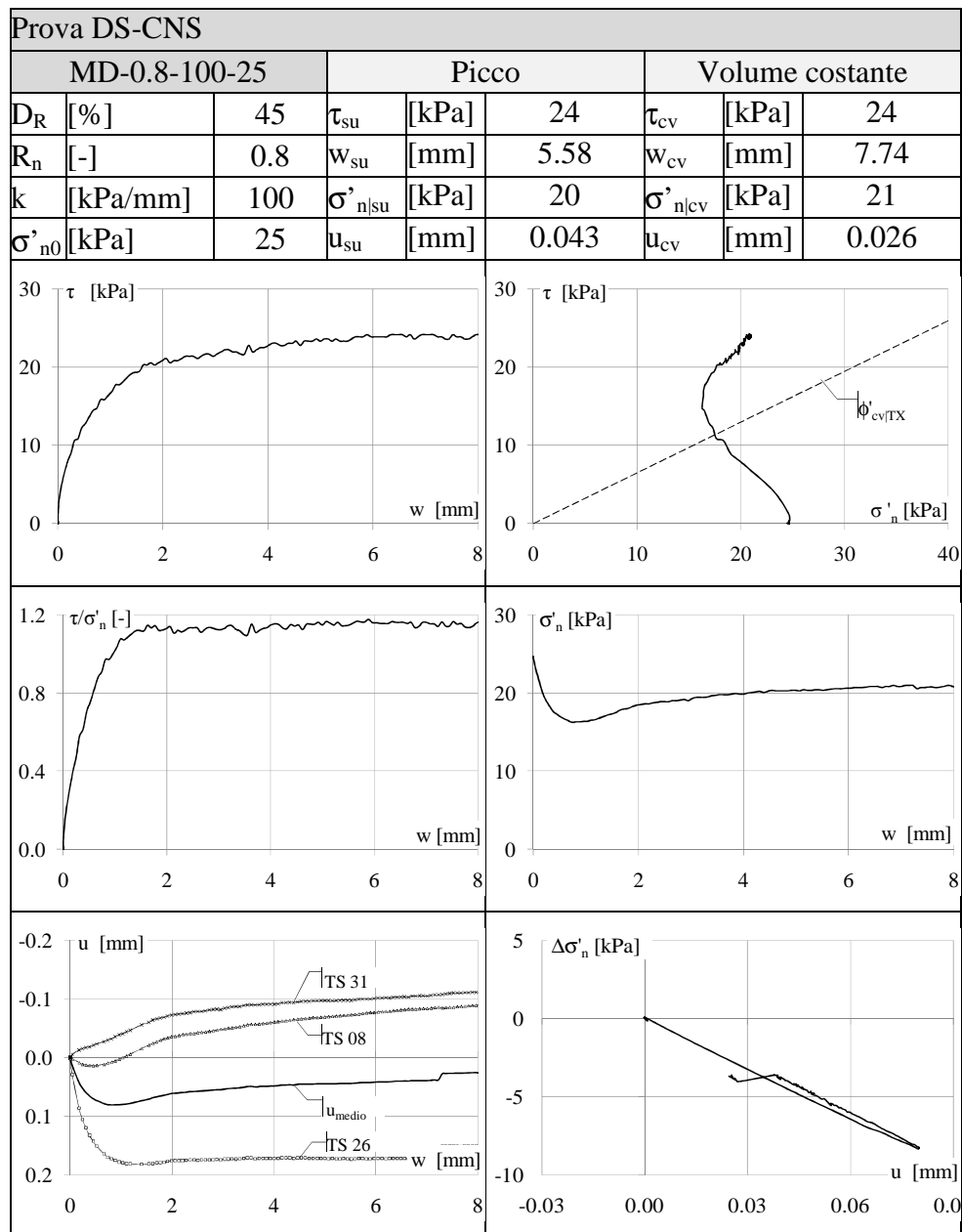


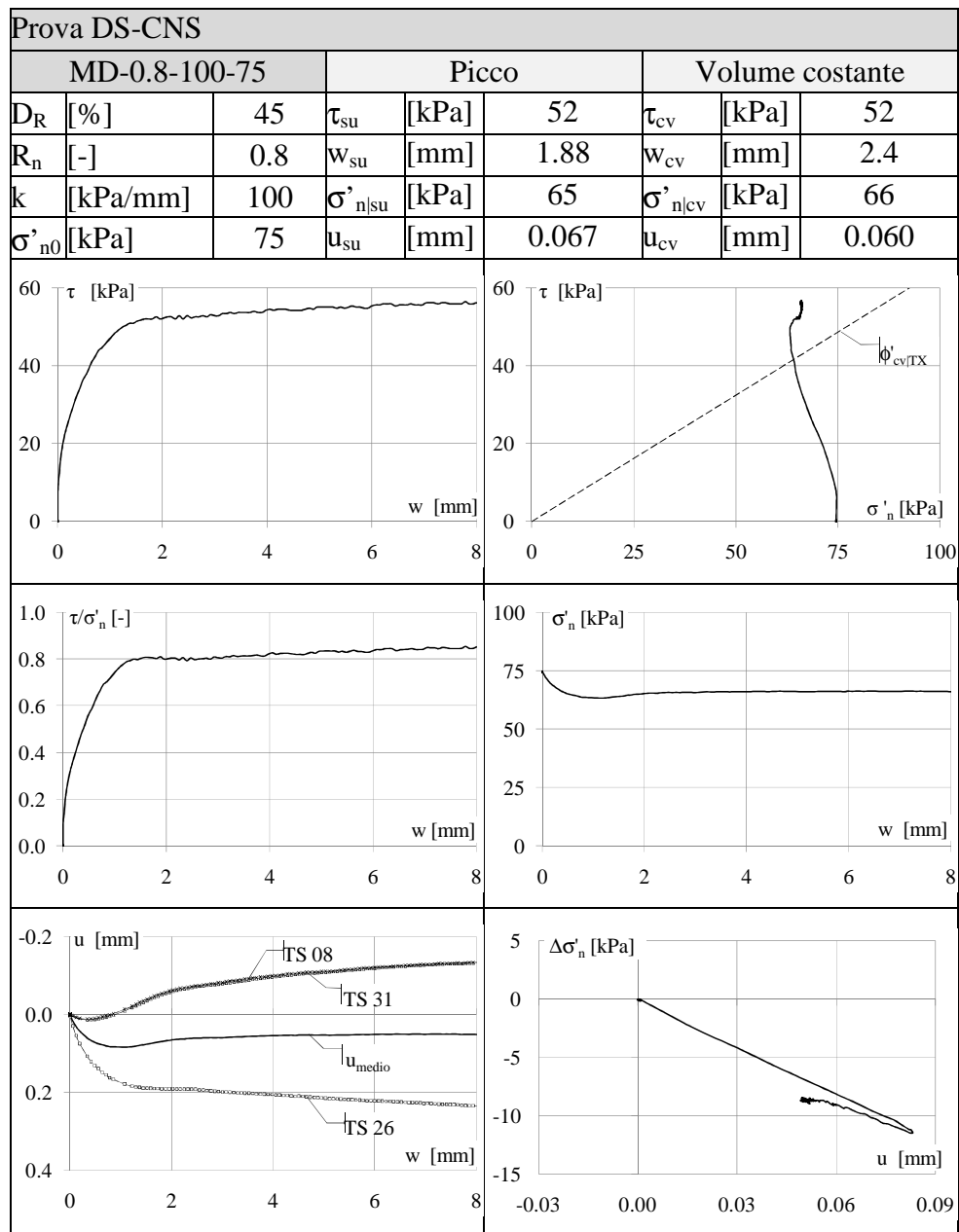




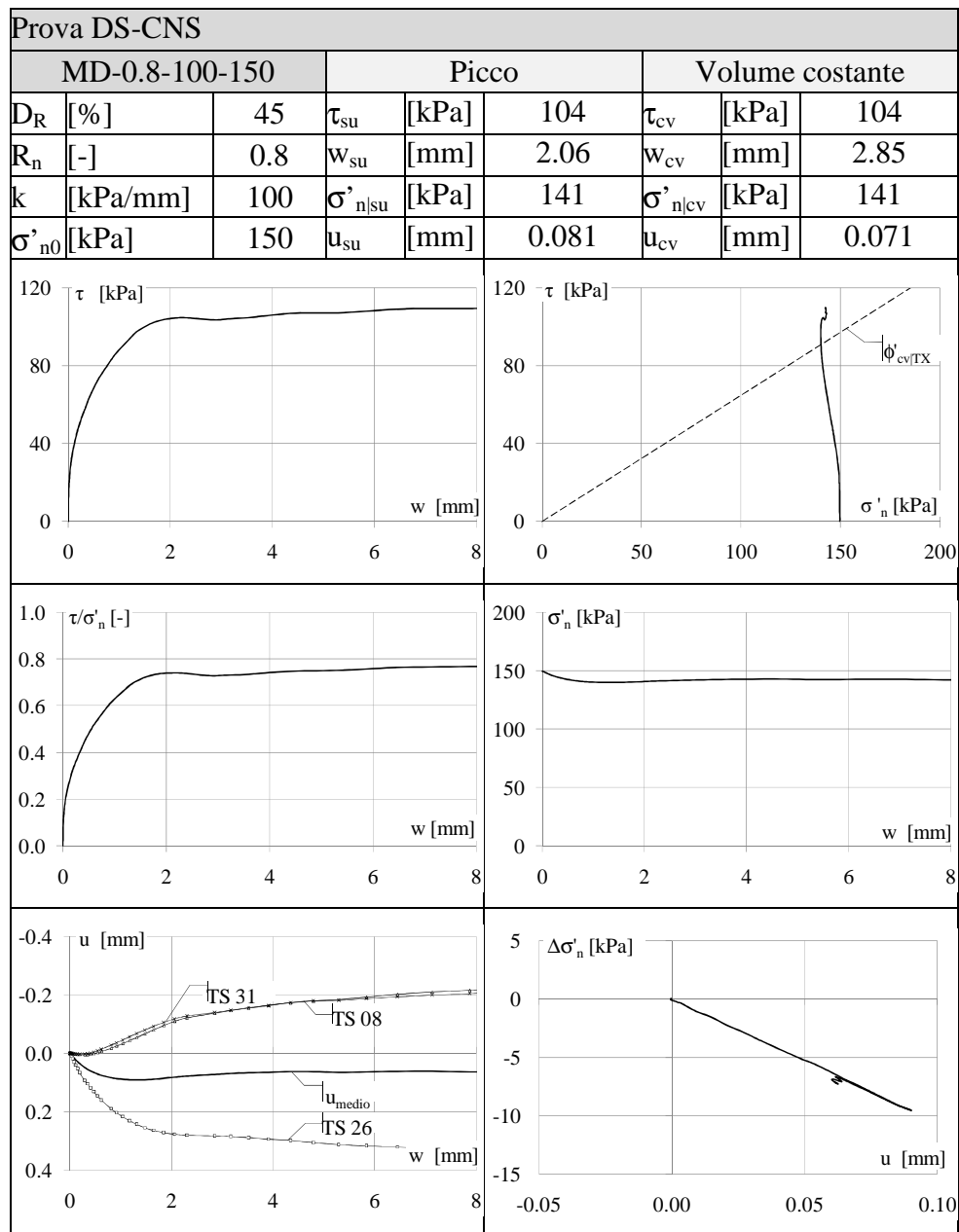


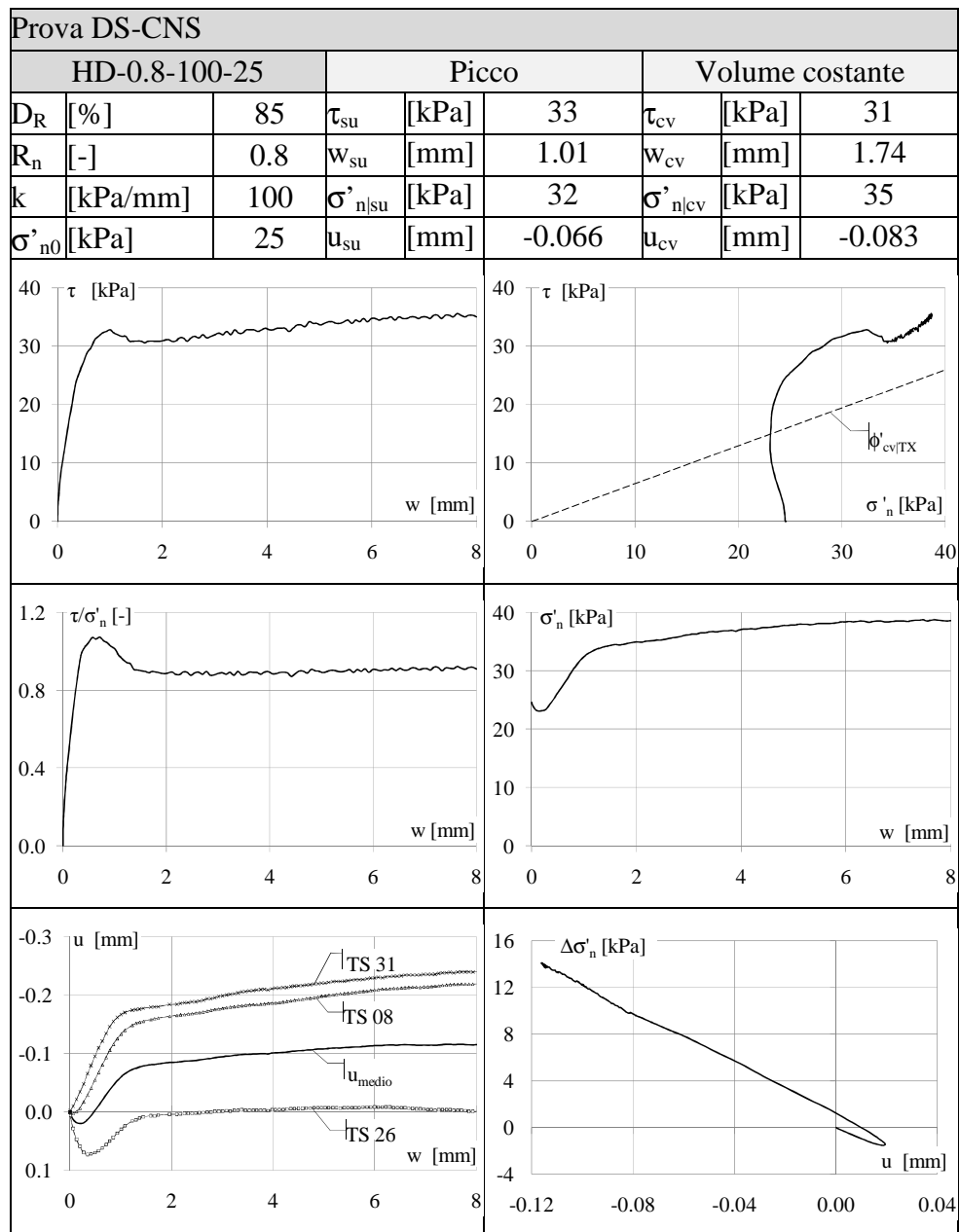


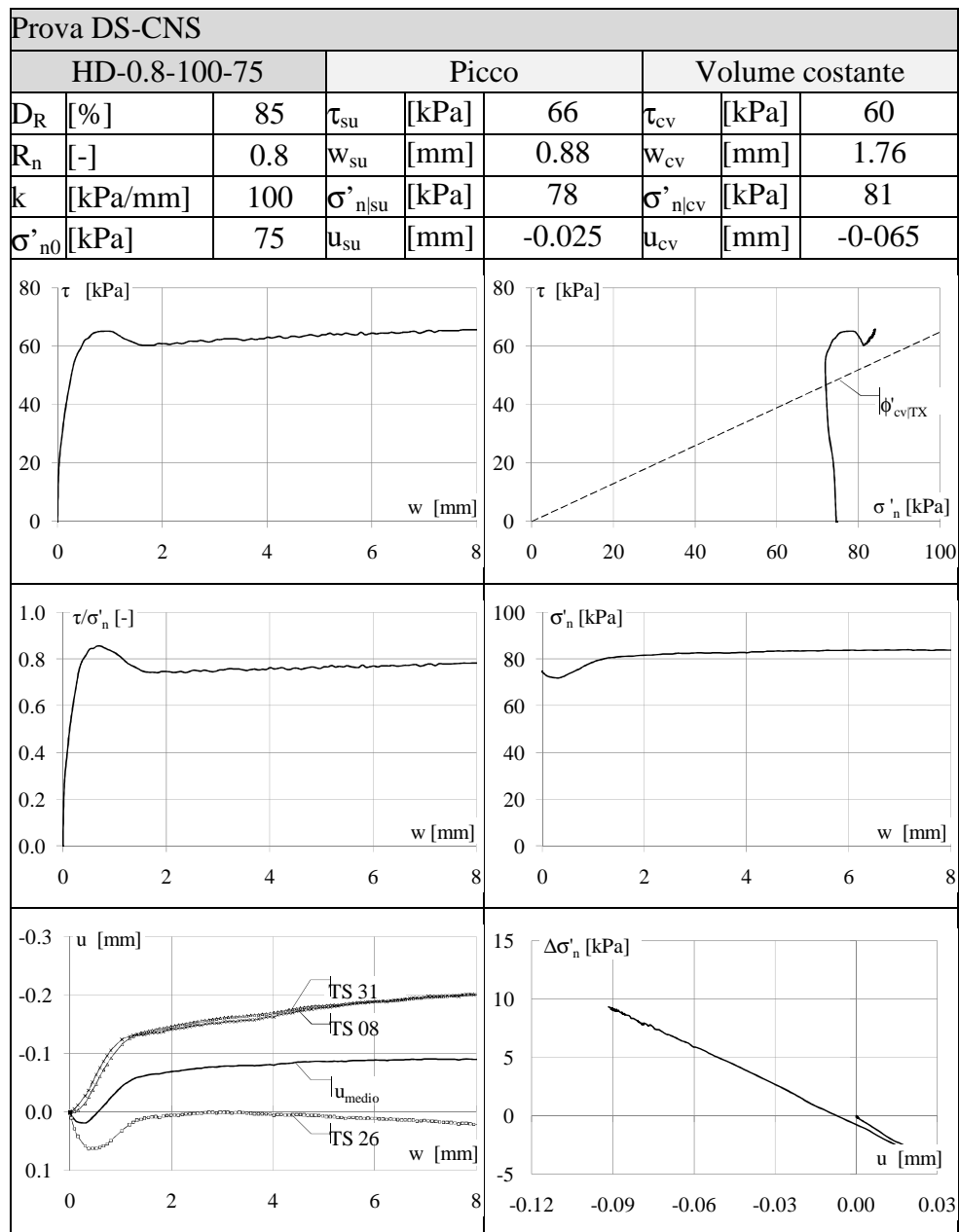


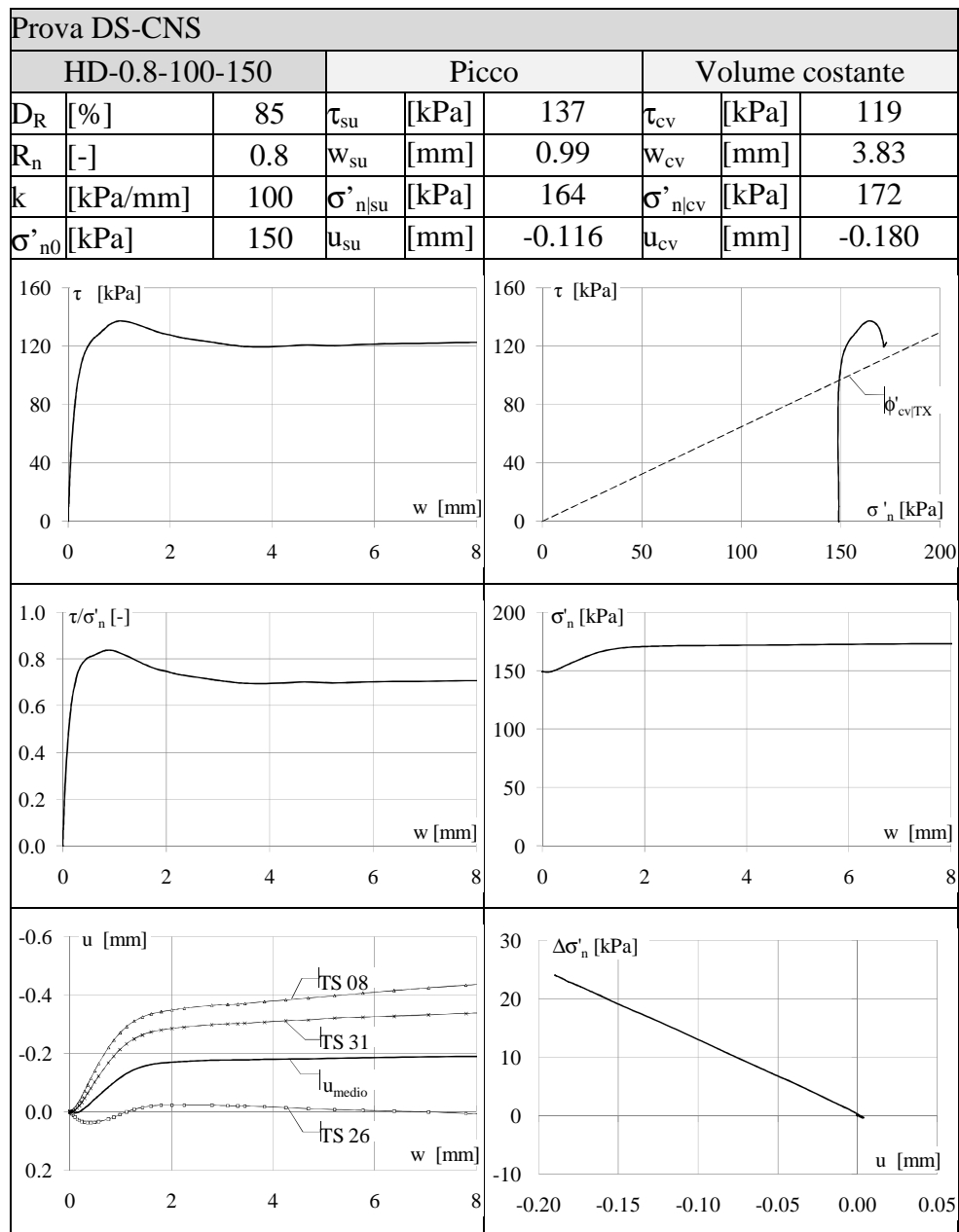


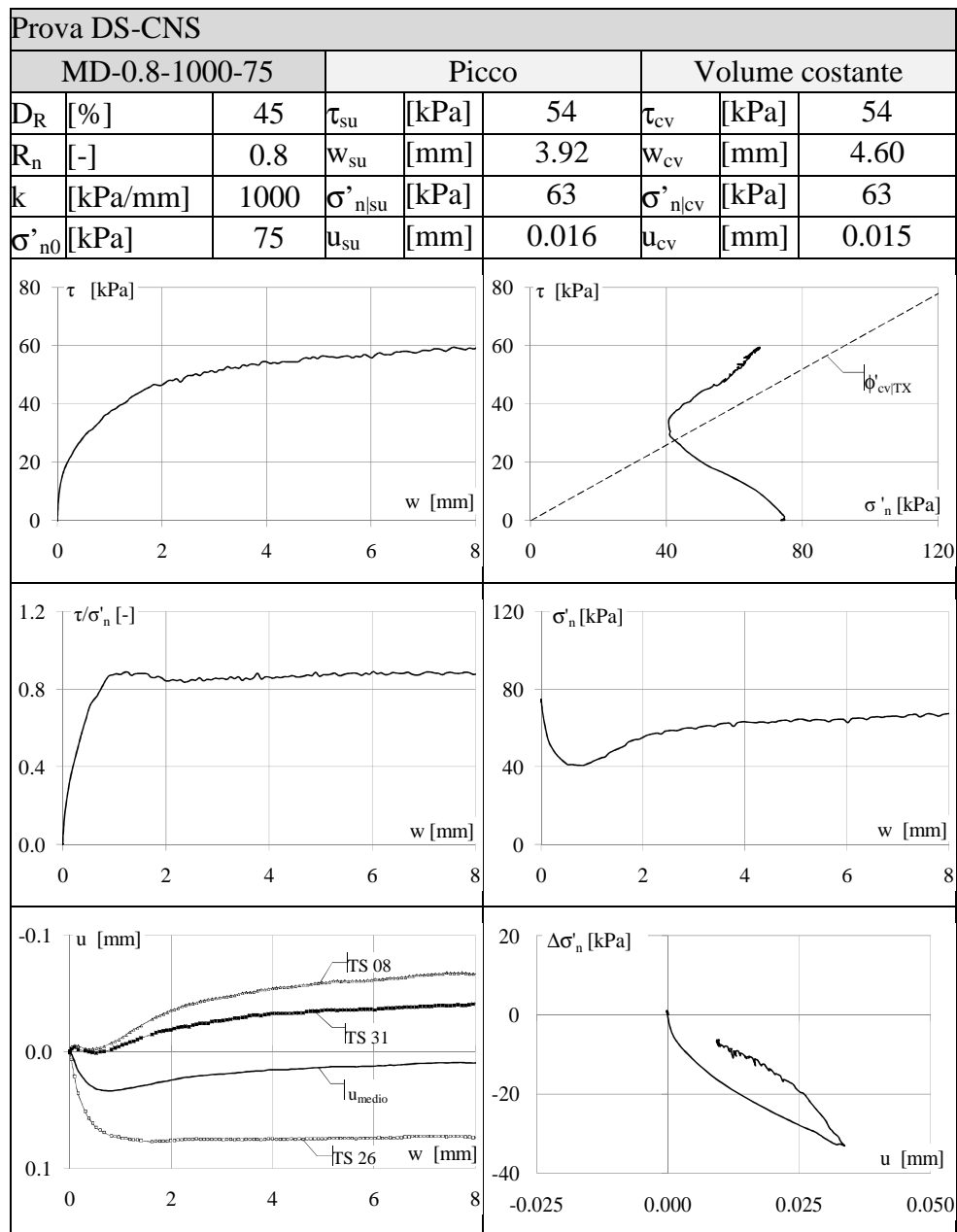


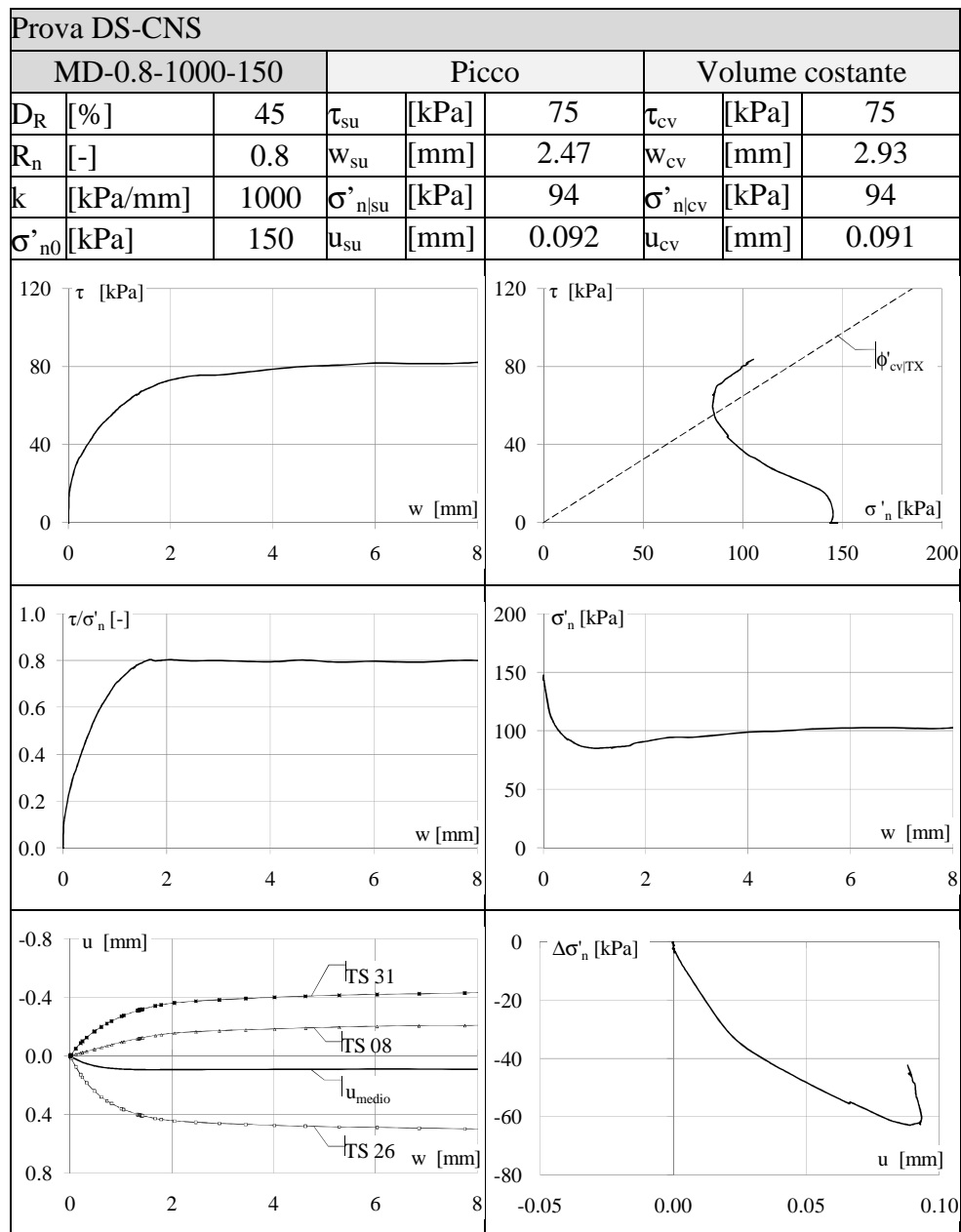


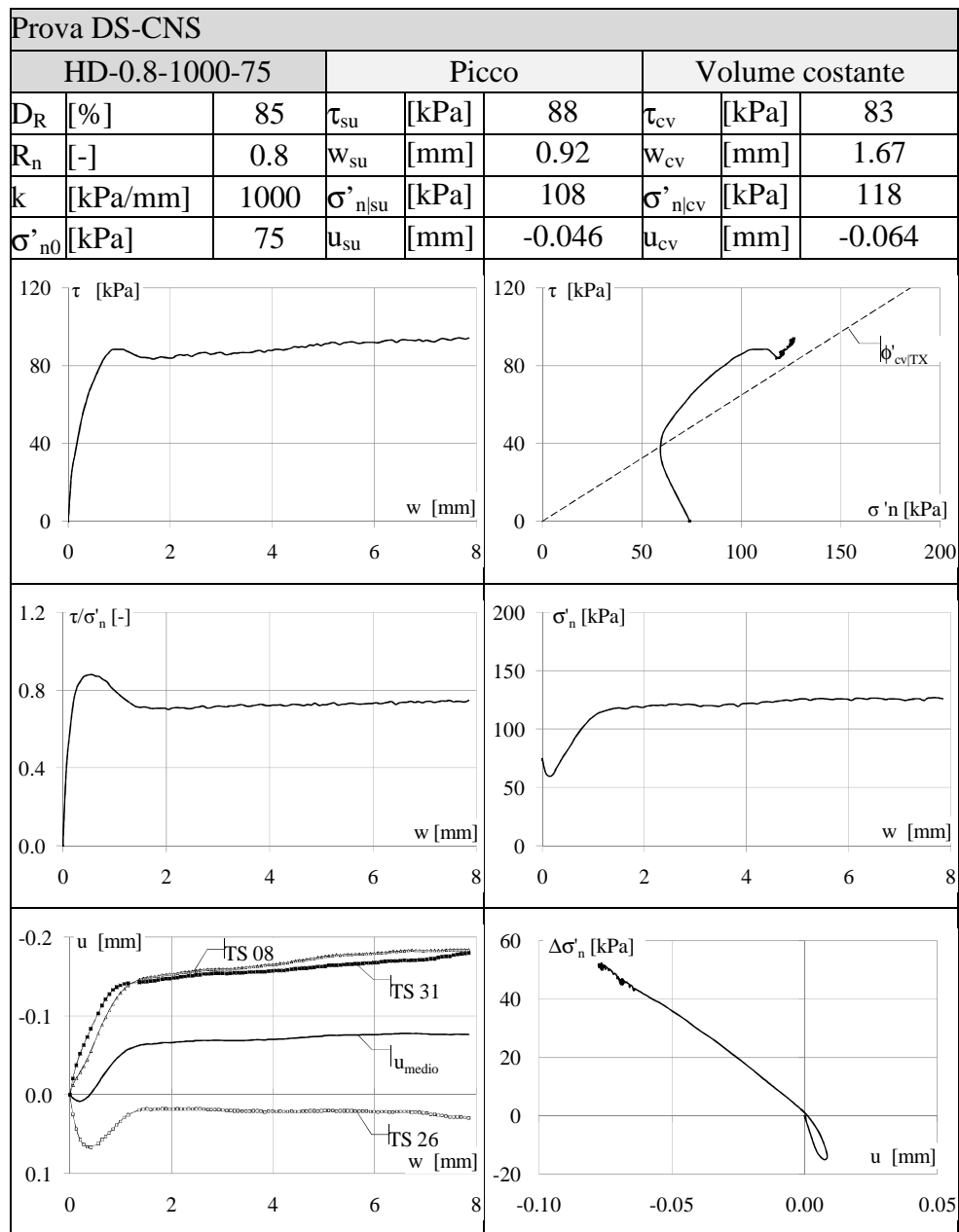


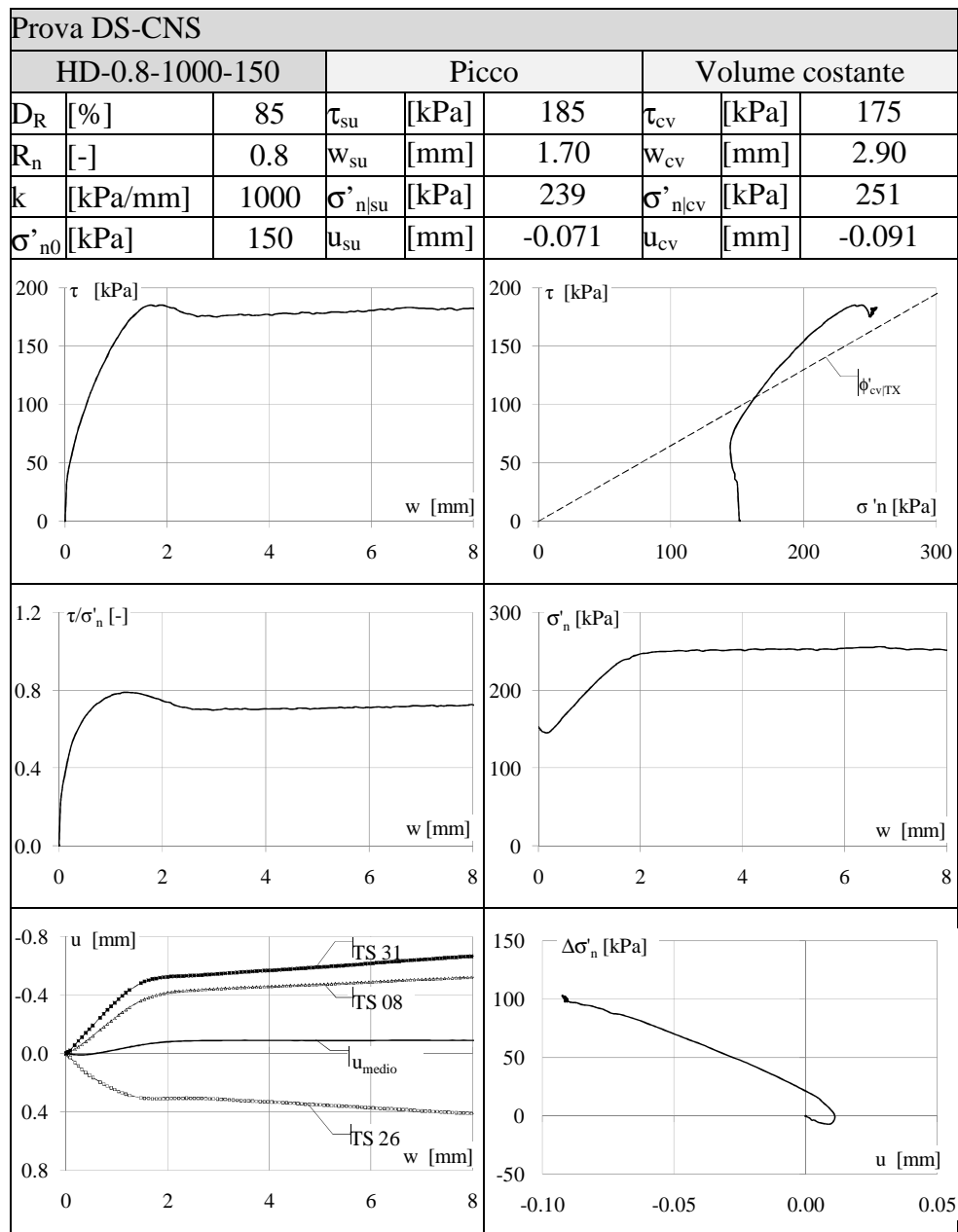














# ***ALLEGATO B***

---

### ***RISULTATI DELLE PROVE DI CARICO IN CENTRIFUGA***

---

Le schede mostrate nell'Allegato B riguardano le prove di carico eseguite su pali modello rugosi idealmente trivellati in campioni di sabbia secca FF ricostruiti a media densità ( $D_R \approx 45-50\%$ ) ed alta densità ( $D_R \approx 75-80\%$ ). I pali sono caricati assialmente in trazione e compressione e sottoposti ad accelerazioni centrifughe comprese tra 30g e 160g.

Si presentano i risultati delle prove di trazione seguiti da quelli di compressione mostrando in successione i grafici del palo  $d_m=8\text{mm}$ ,  $d_m=10\text{ mm}$ ,  $d_m=16\text{ mm}$  e  $d_m=32\text{ mm}$ . Le schede sono ordinate, per ciascun diametro modello, in funzione della  $D_R$  e di accelerazioni crescenti.

Per le prove di trazione sono diagrammati, in scala modello:

- $Q_s - w$  portata laterale media in funzione dello sfilamento
- $Q_{si} - w$  portata laterale sul concio i-esimo in funzione dello sfilamento
- $\tau_s - w$  tensione tangenziale media in funzione dello sfilamento
- $\tau_{si} - w$  tensione tangenziale mobilitata sul concio i-esimo in funzione dello sfilamento

I risultati riportati tengono conto del bulbo detensionato attorno alla base, come descritto al Capitolo 2.

Per le prove di compressione sono diagrammati, in scala modello:

- $Q_{\text{tot}} - w$  carico esterno applicato alla testa del palo in funzione del cedimento
- $Q_s - w$  portata laterale media in funzione del cedimento
- $Q_b - w$  portata di base in funzione del cedimento
- $Q_{si} - w$  portata laterale sul concio i-esimo in funzione del cedimento

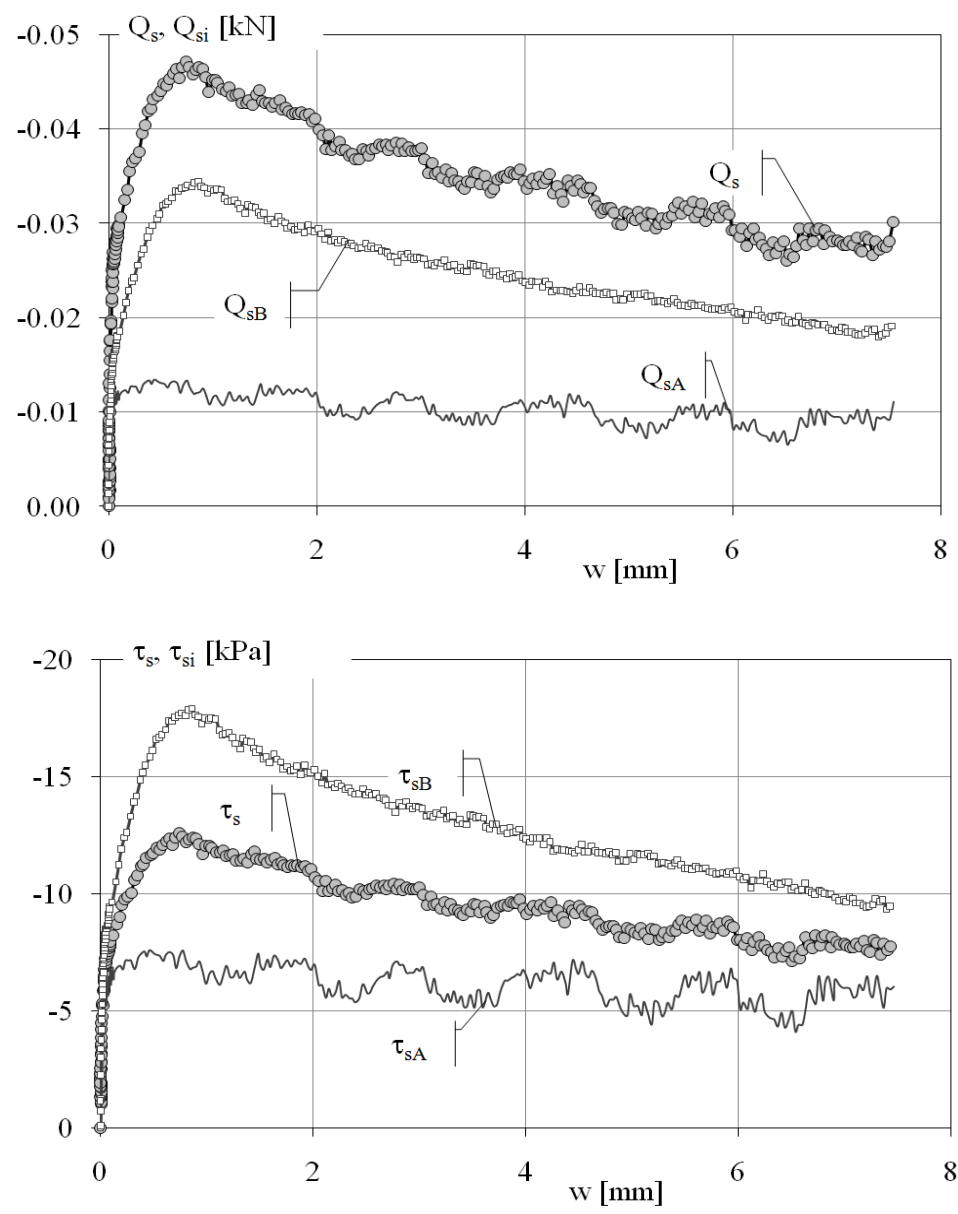
- $\tau_s - w$                       tensione tangenziale media in funzione del cedimento
- $\tau_{si} - w$                       tensione tangenziale mobilitata sul concio i-esimo in funzione del cedimento
- $q_b - w$                       portata di base unitaria in funzione del cedimento

Nei grafici presentati le curve delle portate laterali medie e locale, della portata di base, delle tensioni tangenziali medie e locali, e della portata di base unitaria sono di mobilitazione e non di equilibrio e sono corrette delle tensioni residue mobilitate nella fase di consolidazione, come descritto al Capitolo 2.

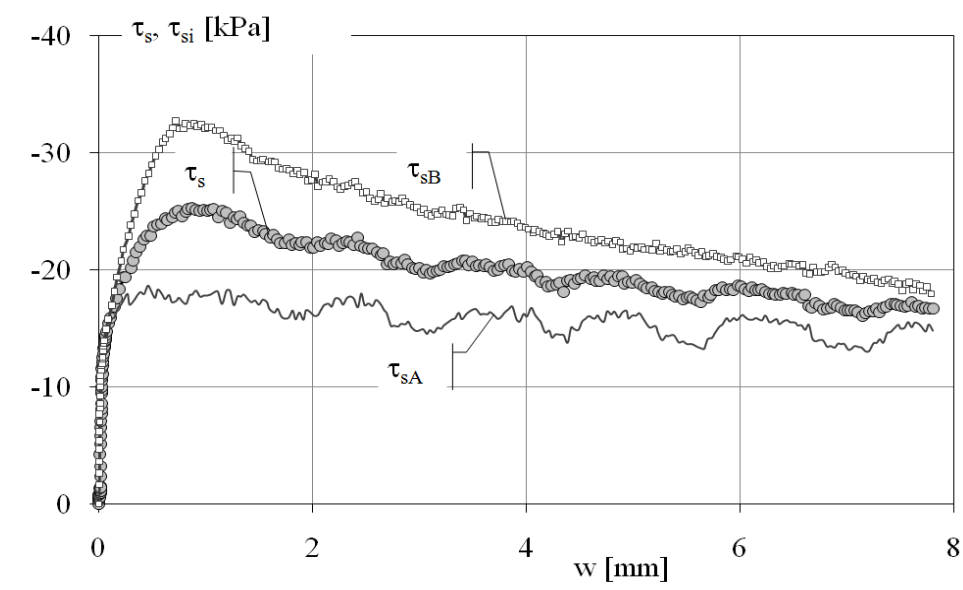
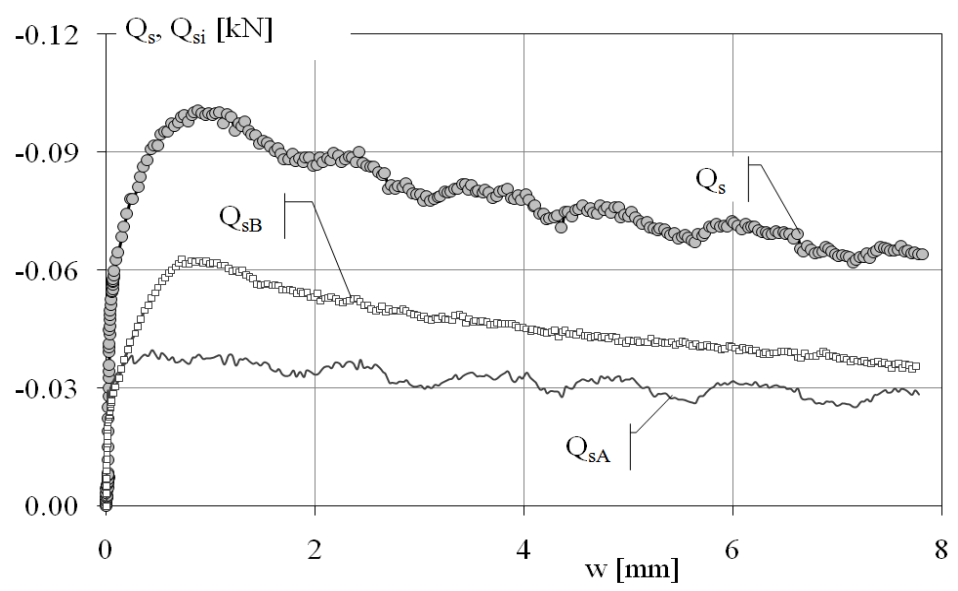
Ogni scheda è introdotta da una tabella che sintetizza i dati della prova di cui si mostrano i risultati:

- Nome della prova
- Direzione del carico assiale
- Tipologia di installazione
- Presenza di strumentazione interna
- Sabbia di prova
- Accelerazione centrifuga imposta a piano campagna ( $a/g$ ) e quella stimata a metà lunghezza del palo modello ( $a/g_{L/2}$ )
- Diametro ( $d_m$ ) e lunghezza ( $L_m$ ) del palo modello
- Densità relativa a fine consolidazione
- $D_{50}$  della sabbia di prova
- Rugosità normalizzata all'interfaccia
- Schema del palo modello con posizione delle celle di misura interne, se presenti
- Profondità media di ciascun concio in scala prototipo (calcolata utilizzando  $a/g_{L/2}$ )
- Tensione efficace verticale e normale al fusto del palo stimate a fine consolidazione in corrispondenza delle  $z$  indicate:  $k_0$  è il coefficiente di spinta a riposo utilizzato per il calcolo di  $\sigma'_{n0}$
- Tensioni tangenziali residue stimate su ciascun concio alla fine della consolidazione

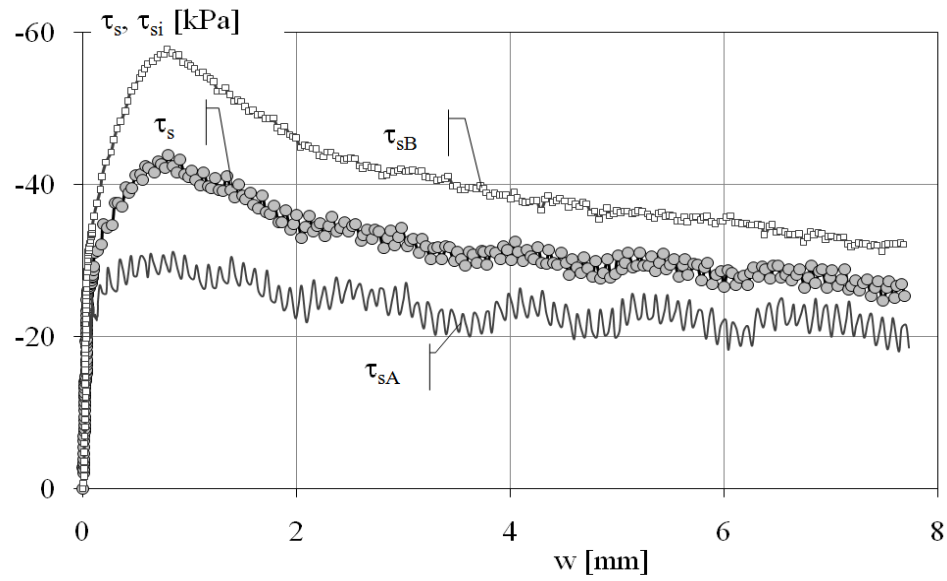
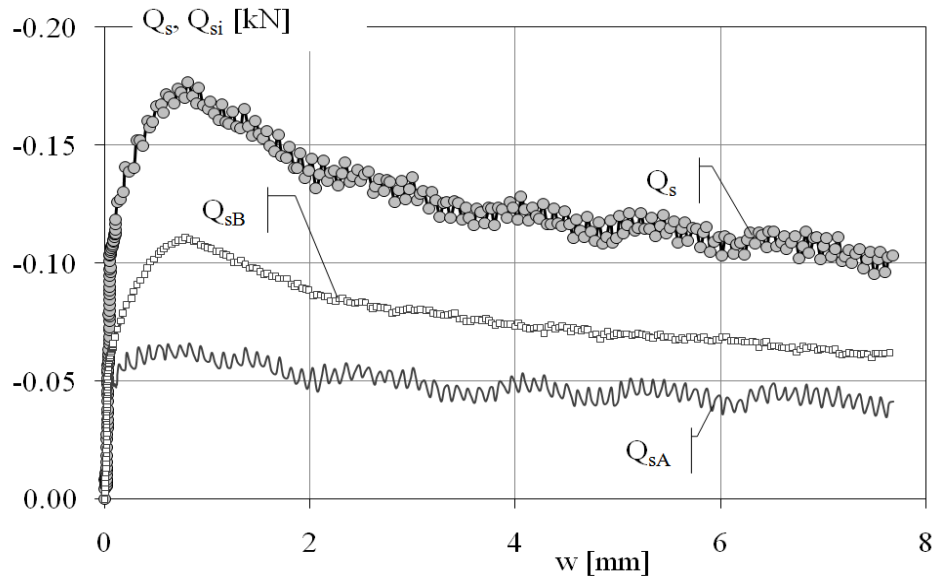
| SPT_8_MD_30                         |             |       |        | Trazione        |          |       |   |   | $z$ [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|-------------------------------------|-------------|-------|--------|-----------------|----------|-------|---|---|---------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato                  |             |       | strum. | Sabbia FF secca |          |       | A | → | 1.0     | 13                   | 6                    | -6                 |
| $a/g$                               | $a/g_{L/2}$ | $d_m$ | $L_m$  | $D_R$           | $D_{50}$ | $R_n$ |   |   | 3.1     | 42                   | 19                   | 6                  |
| [-]                                 | [-]         | [mm]  | [mm]   | [%]             | [mm]     | [-]   | B | → |         |                      |                      |                    |
| 30                                  | 32          | 8     | 160    | 51              | 0.093    | 1.4   |   |   |         |                      |                      |                    |
| $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |             |       |        |                 |          |       |   |   |         |                      |                      |                    |




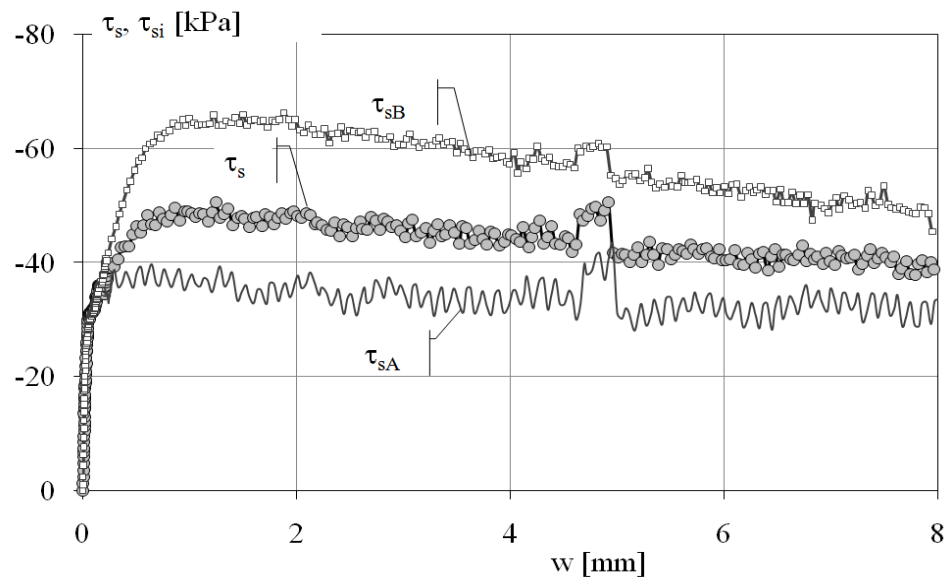
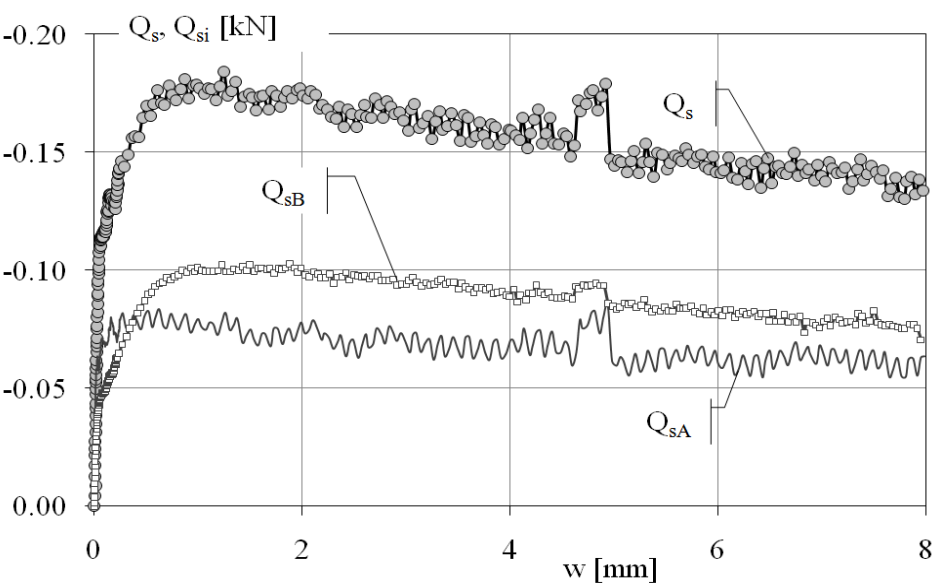
| SPT_8_MD_60        |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   |                                     | z [m] | $\sigma'_{v0}$<br>[kPa] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{res}$<br>[kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|-------------------------------------|-------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |                                     | 2.4   | 33                      | 15                      | -13                   |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |                                     | 7.1   | 97                      | 44                      | 15                    |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |                                     |       |                         |                         |                       |
| 60                 | 64                 | 8              | 160            | 55              | 0.093           | 1.4            |   |                                     |       |                         |                         |                       |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |       |                         |                         |                       |





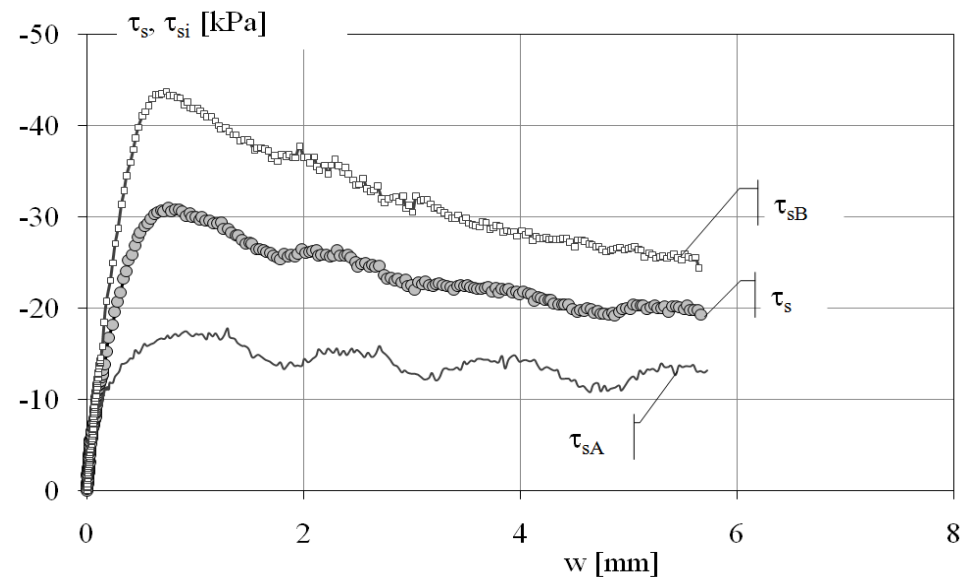
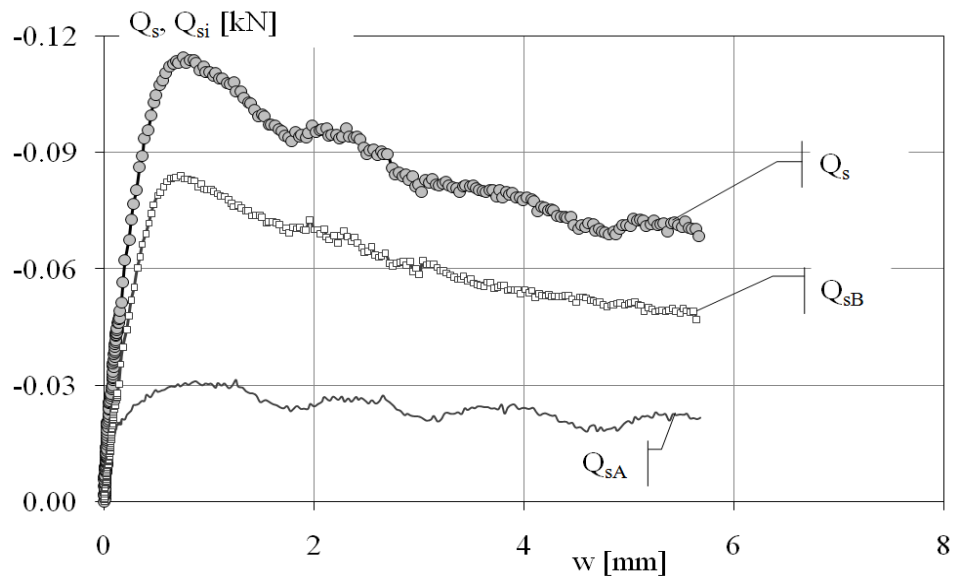
| SPT_8_MD_120       |                    |                |                | Trazione        |                 |                |                                     |  | z [m] | $\sigma'_{v0}$<br>[kPa] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{res}$<br>[kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------------------------|--|-------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A                                   |  | 4.9   | 66                      | 30                      | -19                   |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B                                   |  | 14.1  | 196                     | 89                      | 22                    |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |                                     |  |       |                         |                         |                       |
| 120                | 128                | 8              | 160            | 57              | 0.093           | 1.4            |                                     |  |       |                         |                         |                       |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |  |       |                         |                         |                       |



| SPT_8_MD_160       |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   |   | z [m]                               | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 6.3                                 | 86                   | 39                   | -23                |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   | 17.3                                | 237                  | 108                  | 49                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                      |                      |                    |
| 160                | 167                | 8              | 160            | 57              | 0.093           | 1.4            | B |   |                                     |                      |                      |                    |

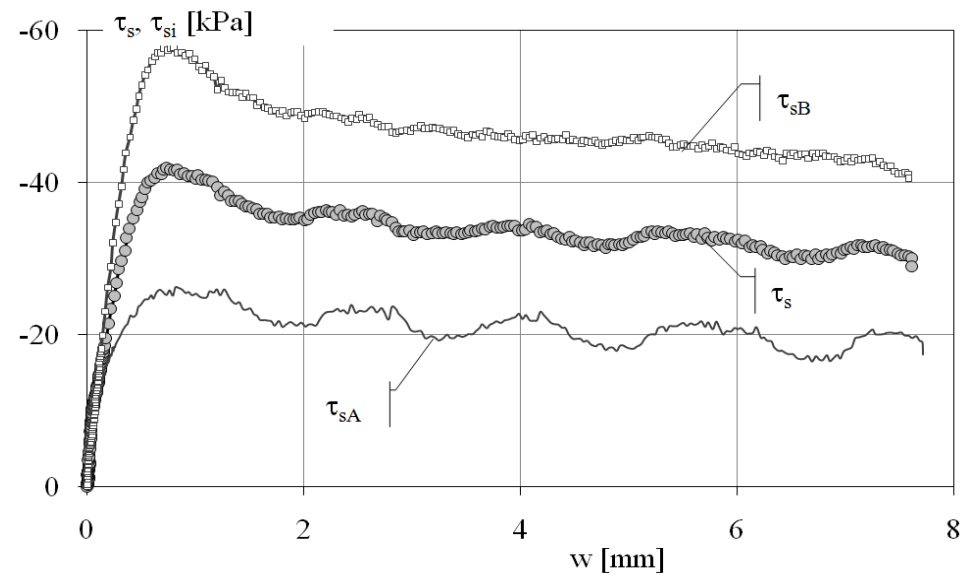
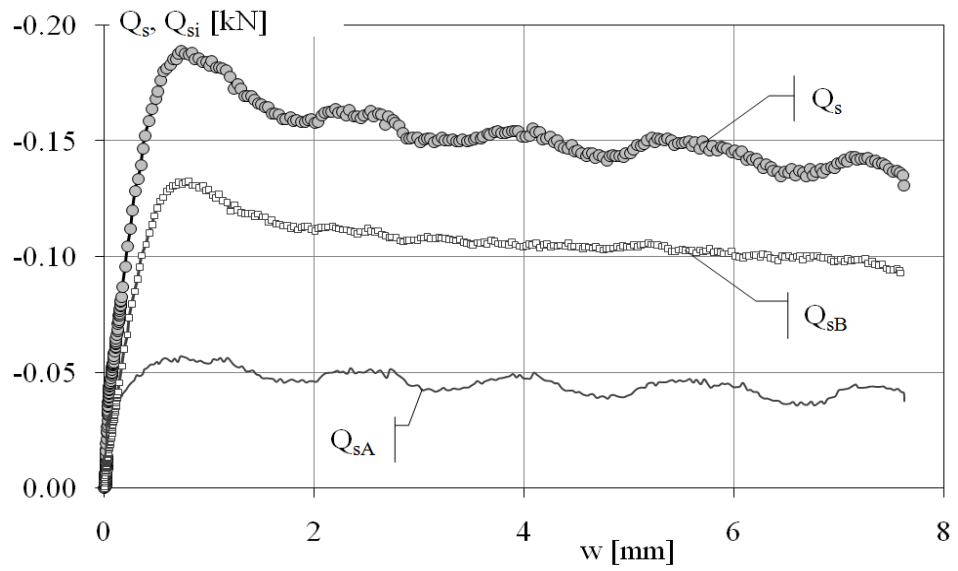



| SPT_8_HD_30        |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$<br>[kPa] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{res}$<br>[kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| idealm. trivellato |                    | strum.         |                | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 1.0   | 15                      | 7                       | -7                    |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   | 3.2   | 46                      | 21                      | 6                     |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            | B |  |       |                         |                         |                       |
| 30                 | 32                 | 8              | 160            | 83              | 0.093           | 1.4            |   |   |       |                         |                         |                       |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   | k <sub>0</sub> = 1-senφ' <sub>cv</sub> =0.455                                     |       |                         |                         |                       |

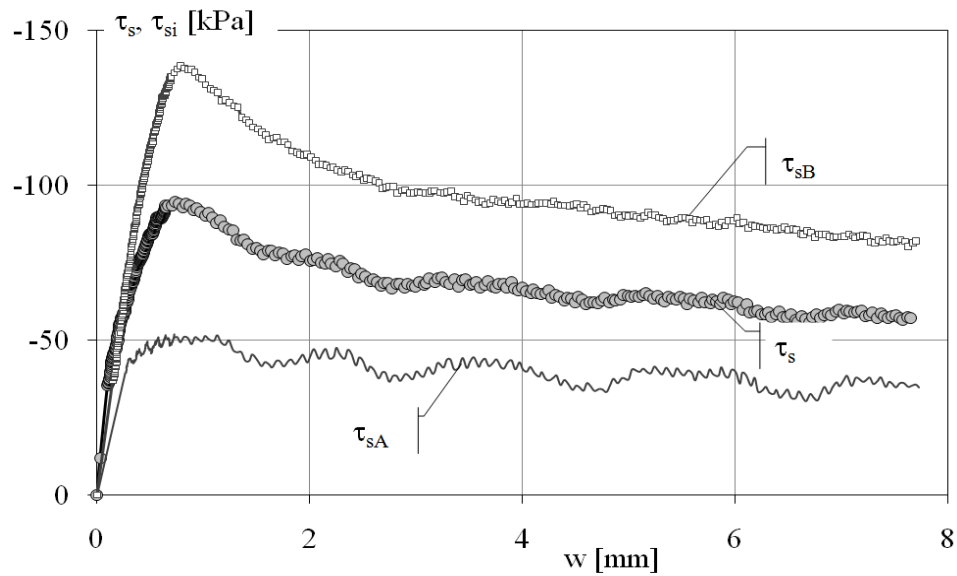
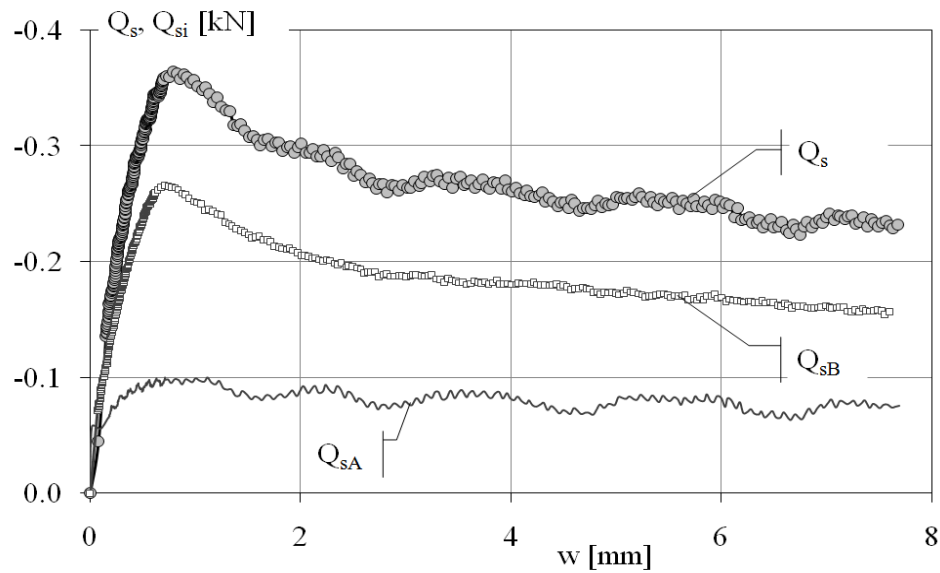





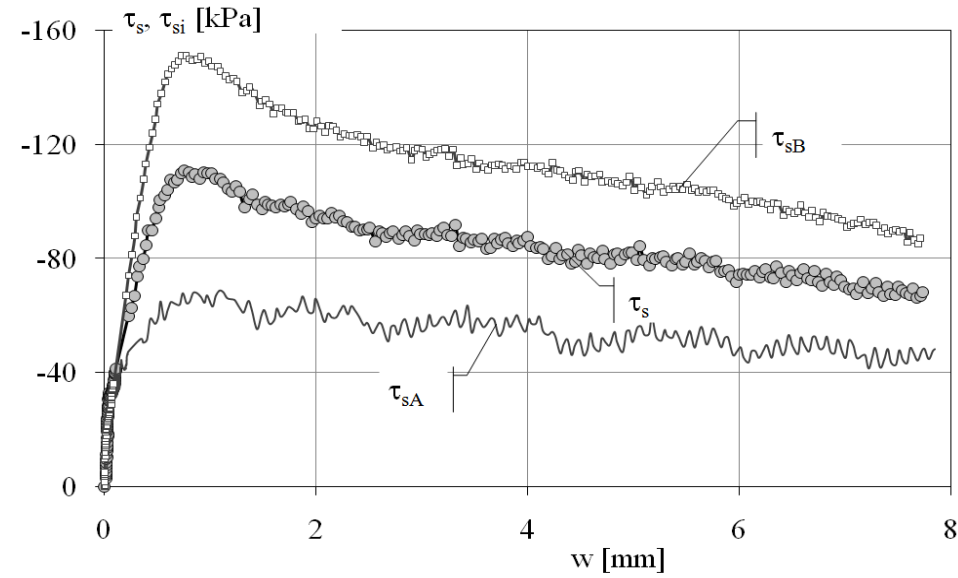
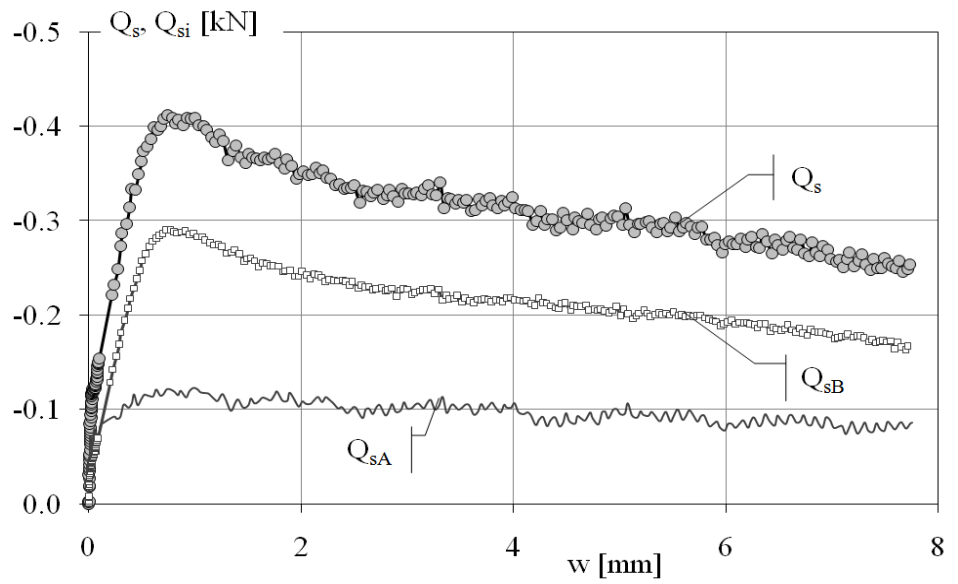
| SPT_8_HD_60        |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   |                                     | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|-------------------------------------|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |                                     | 2.5   | 35                   | 16                   | -12                |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |                                     |       |                      |                      |                    |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            | B |                                     | 7.6   | 112                  | 51                   | 13                 |
| 60                 | 64                 | 8              | 160            | 83              | 0.093           | 1.4            |   |                                     |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |       |                      |                      |                    |




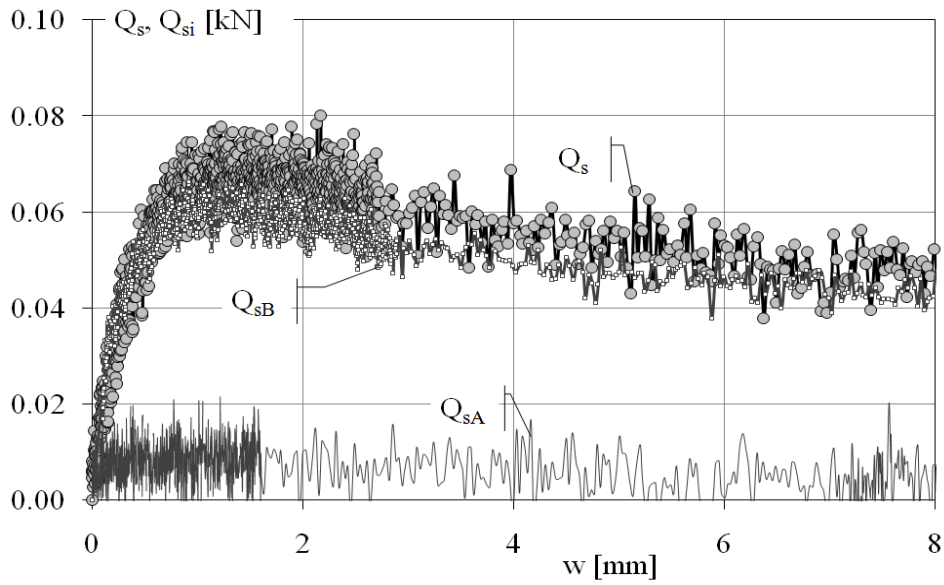
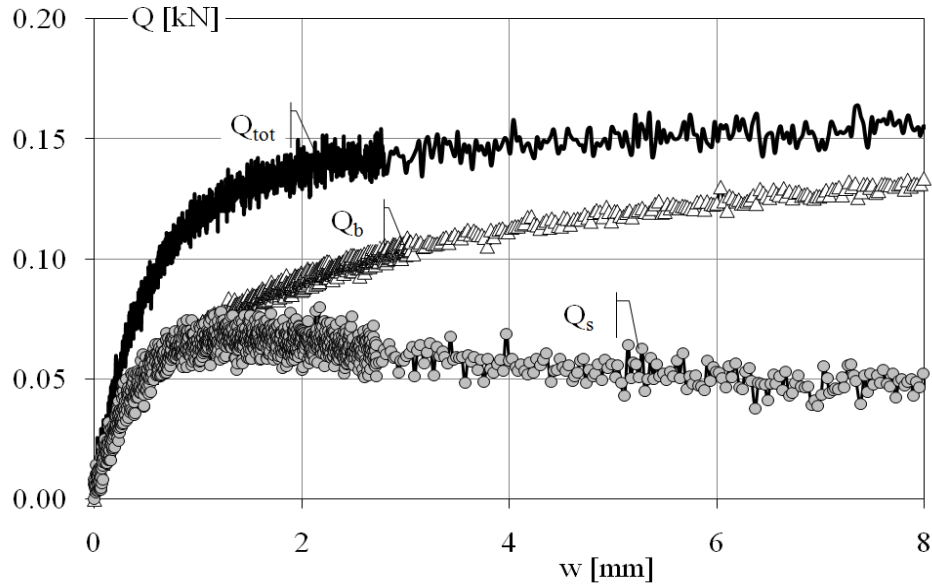
| SPT_8_HD_120       |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$<br>[kPa] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{res}$<br>[kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 4.3   | 62                      | 28                      | -30                   |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |   | 13    | 193                     | 88                      | 36                    |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   |       |                         |                         |                       |
| 120                | 128                | 8              | 160            | 84              | 0.093           | 1.4            |   |   |       |                         |                         |                       |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$   |       |                         |                         |                       |




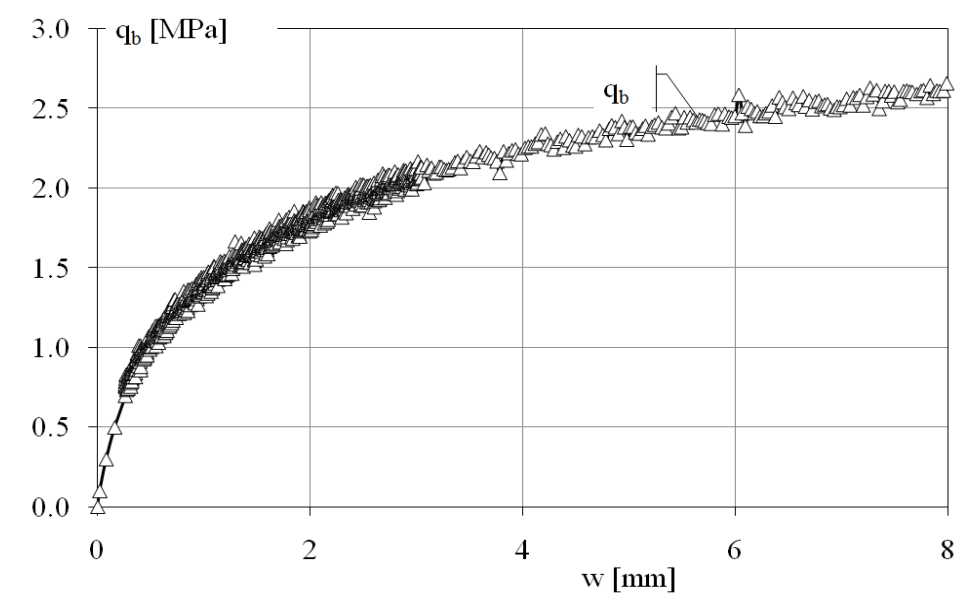
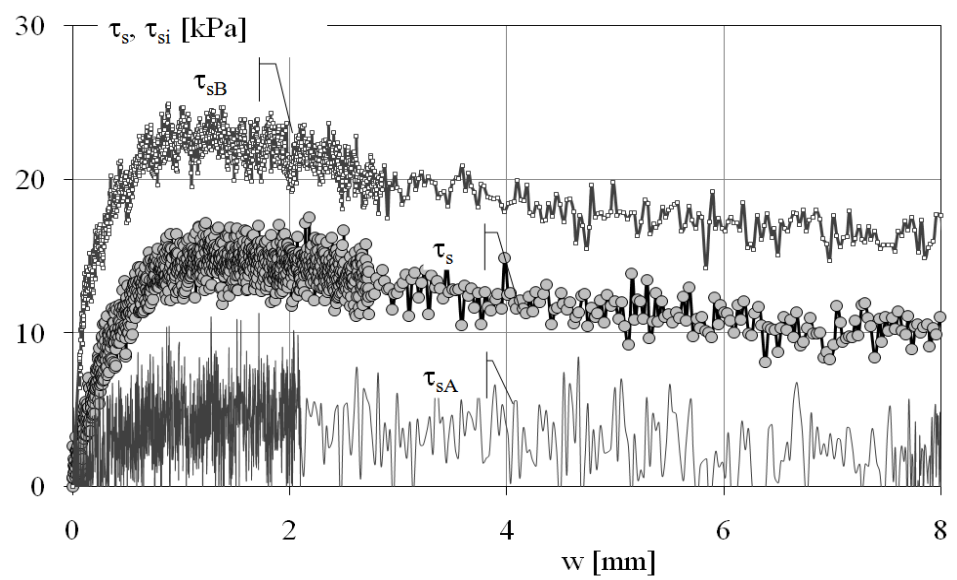
| SPT_8_HD_160       |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$<br>[kPa] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{res}$<br>[kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 5.3   | 77                      | 35                      | -38                   |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |   | 16.4  | 242                     | 110                     | 45                    |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   |       |                         |                         |                       |
| 160                | 167                | 8              | 160            | 87              | 0.093           | 1.4            |   |   |       |                         |                         |                       |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$   |       |                         |                         |                       |




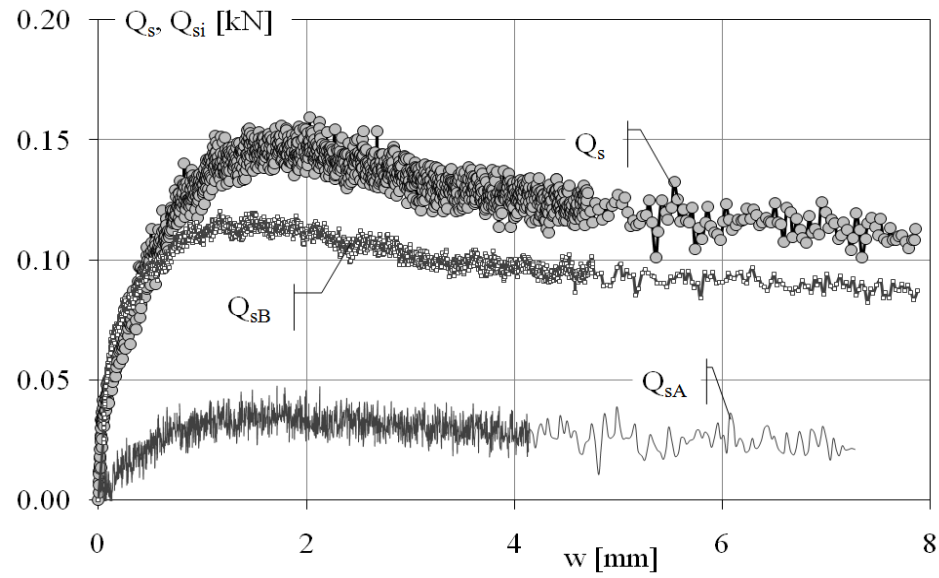
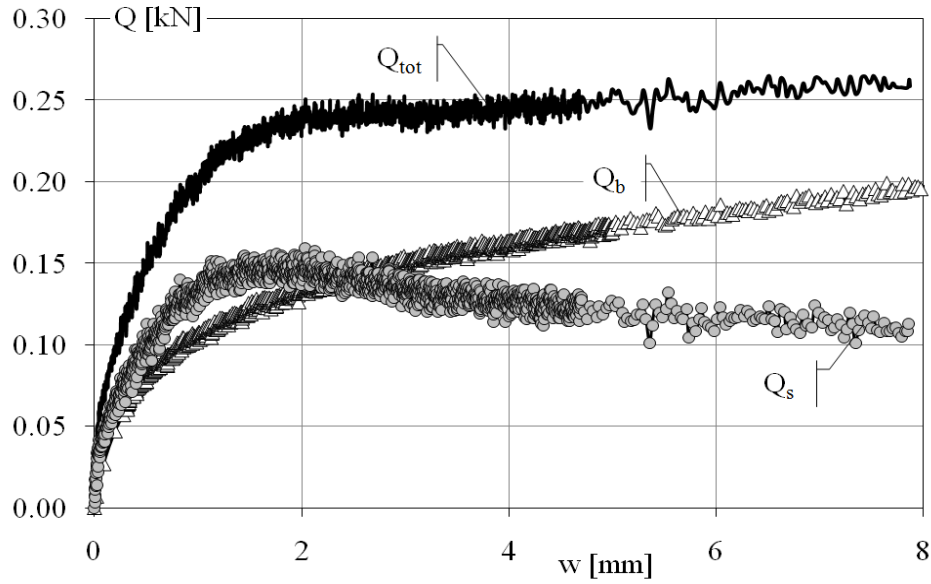
| SPC_8_MD_30        |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |   | z [m]                               | $\sigma'_{v0}$<br>[kPa] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{res}$<br>[kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------------------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 1.1                                 | 13                      | 6                       | -18                   |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   | 3.6                                 | 48                      | 22                      | 9                     |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   |                                     |                         |                         |                       |
| 30                 | 32                 | 8              | 160            | 50              | 0.093           | 1.4            |   |   |                                     |                         |                         |                       |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   |   | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                         |                         |                       |




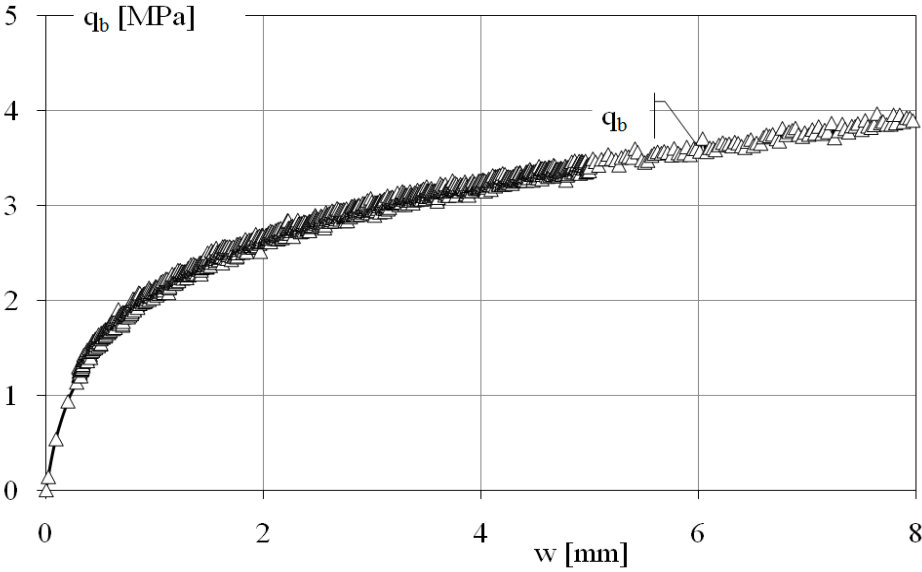
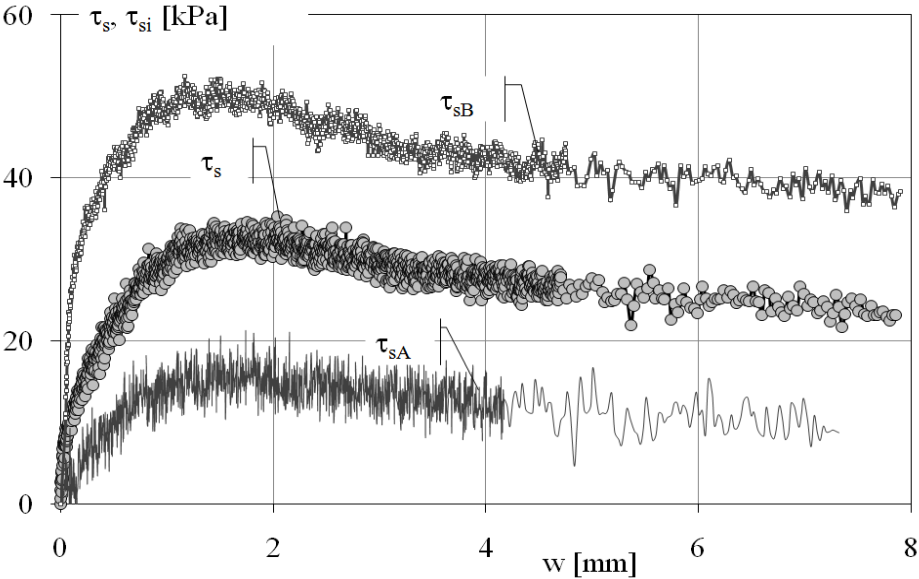
| SPC_8_MD_30        |                    |                |                | Compressione    |                 |                |                                  |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$<br>[kPa] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{res}$<br>[kPa] |   |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------------------------|---|-------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|---|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A                                |  | 1.1   | 13                      | 6                       | -18                   |   |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |                                  |   |       |                         |                         |                       |   |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |                                  |   |       |                         |                         |                       |   |
| 30                 | 32                 | 8              | 160            | 50              | 0.093           | 1.4            |                                  |   | B     | 3.6                     | 48                      | 22                    | 9 |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |                                  |   |       |                         |                         |                       |   |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                | k <sub>0</sub> = 1-senφ'cv=0.455 |   |       |                         |                         |                       |   |




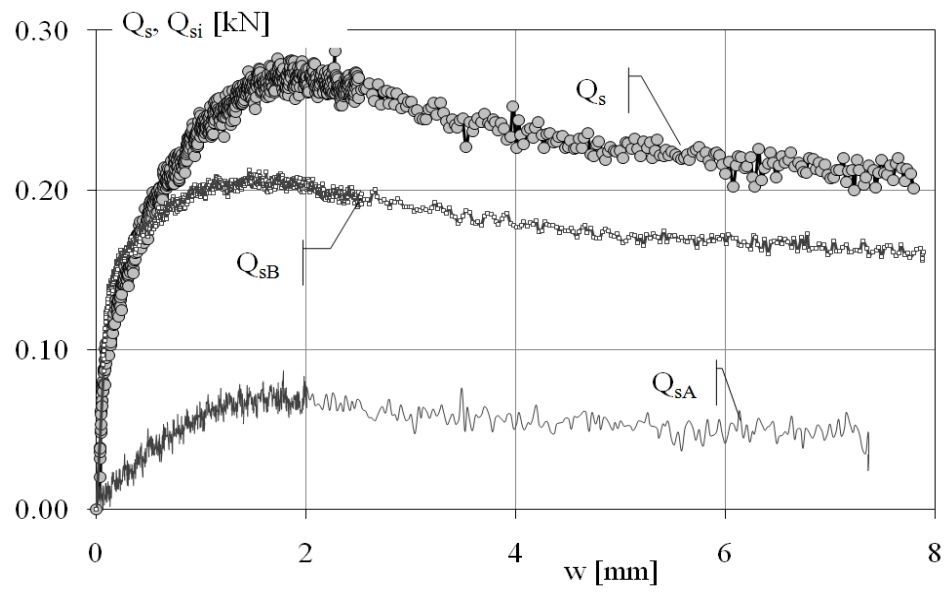
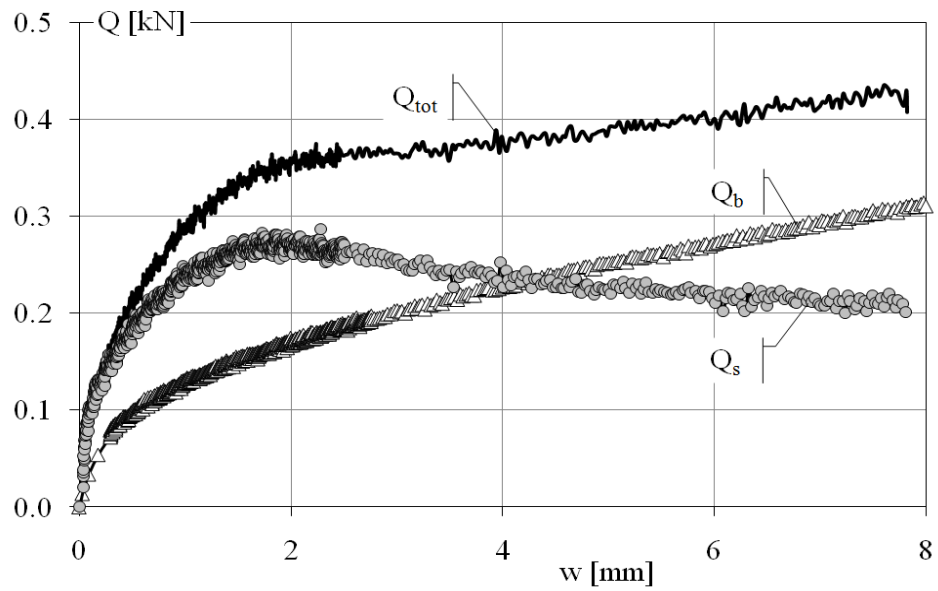
| SPC_8_MD_60        |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |   | z [m]                                    | $\sigma'_{v0}$<br>[kPa] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{res}$<br>[kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|--|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 2.5                                      | 33                      | 15                      | -16                   |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   | 7.6                                      | 103                     | 47                      | 11                    |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   |  |                         |                         |                       |
| 60                 | 64                 | 8              | 160            | 53              | 0.093           | 1.4            |   |   |  |                         |                         |                       |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   |   | $k_0 = 1 - \text{sen}\phi'_{cv} = 0.455$ |                         |                         |                       |




| SPC_8_MD_60        |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$<br>[kPa] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{res}$<br>[kPa] |    |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|----|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A   |  | 2.5   | 33                      | 15                      | -16                   |    |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   |       |                         |                         |                       |    |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   |       |                         |                         |                       |    |
| 60                 | 64                 | 8              | 160            | 53              | 0.093           | 1.4            |   |   | B     | 7.6                     | 103                     | 47                    | 11 |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   |   |       |                         |                         |                       |    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                | k <sub>0</sub> = 1-senφ' <sub>cv</sub> =0.455 |   |       |                         |                         |                       |    |

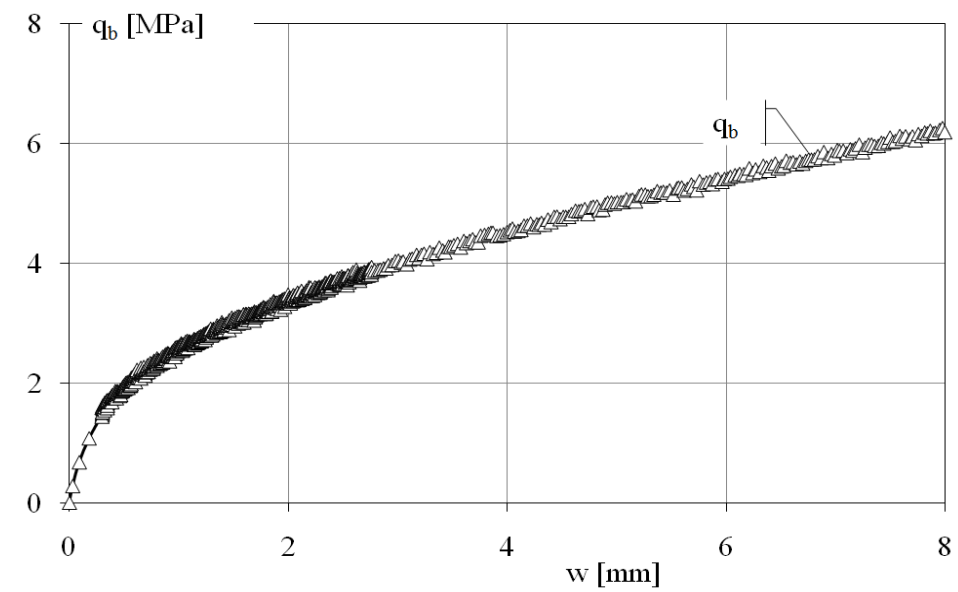
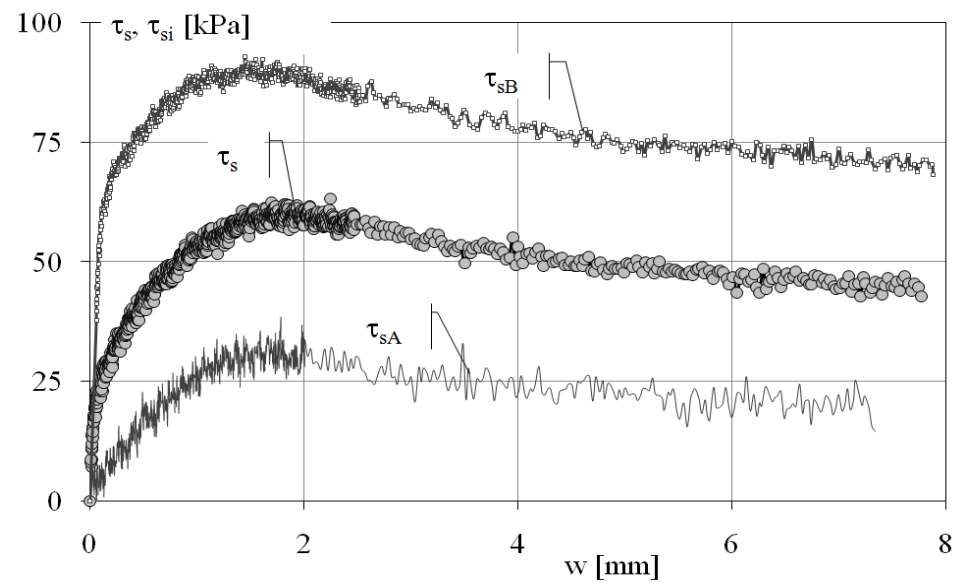


| SPC_8_MD_120       |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |   | z [m]                                    | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |    |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|--|----------------------|----------------------|--------------------|----|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 5.0                                      | 66                   | 30                   | -30                |    |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   |  |                      |                      |                    |    |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   |  |                      |                      |                    |    |
| 120                | 128                | 8              | 160            | 55              | 0.093           | 1.4            |   |   | B  | 15.2                 | 209                  | 95                 | 38 |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   |   | $k_0 = 1 - \text{sen}\phi'_{cv} = 0.455$ |                      |                      |                    |    |

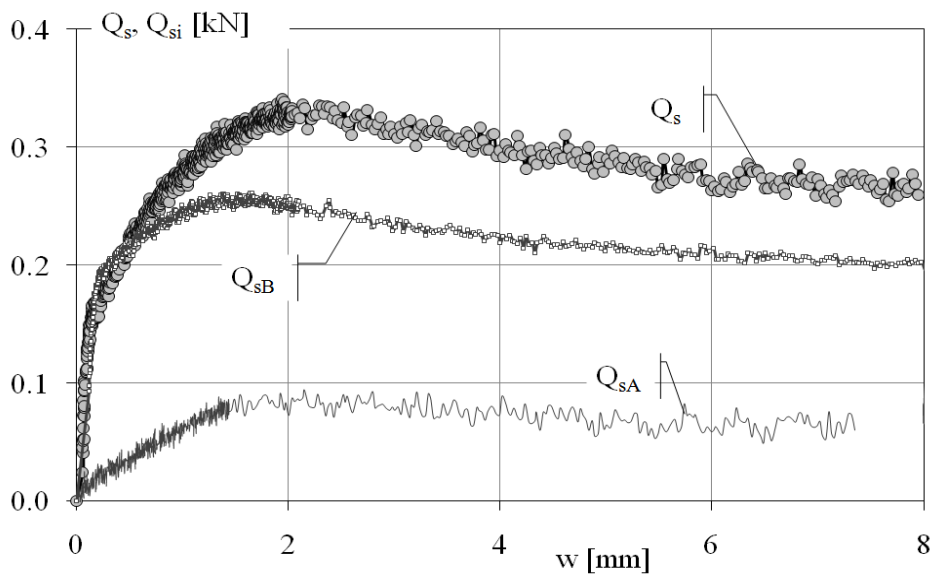
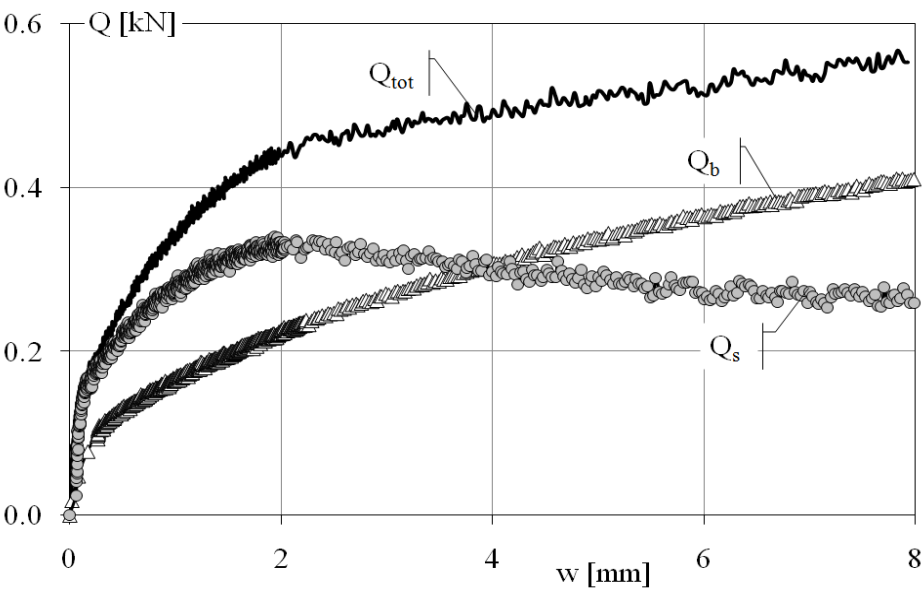





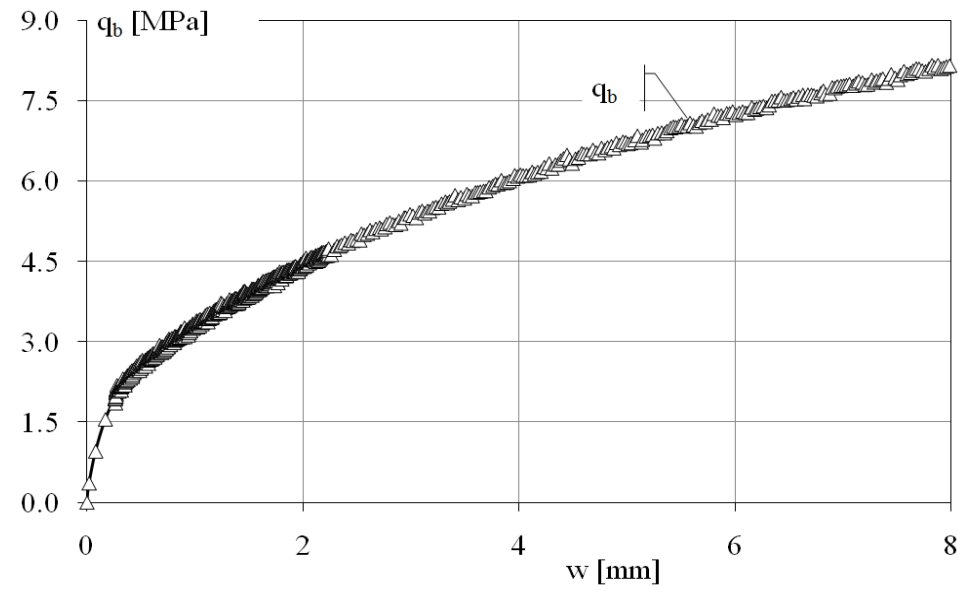
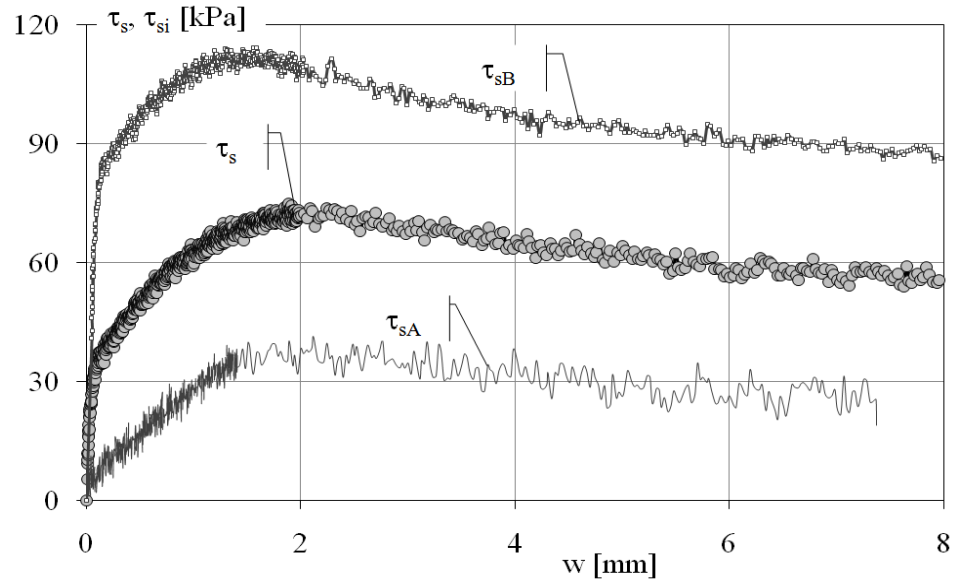
| SPC_8_MD_120       |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    | strum.         |                | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 5.0   | 66                   | 30                   | -30                |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   | 15.2  | 209                  | 95                   | 38                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   |       |                      |                      |                    |
| 120                | 128                | 8              | 160            | 55              | 0.093           | 1.4            | B |   |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$   |       |                      |                      |                    |




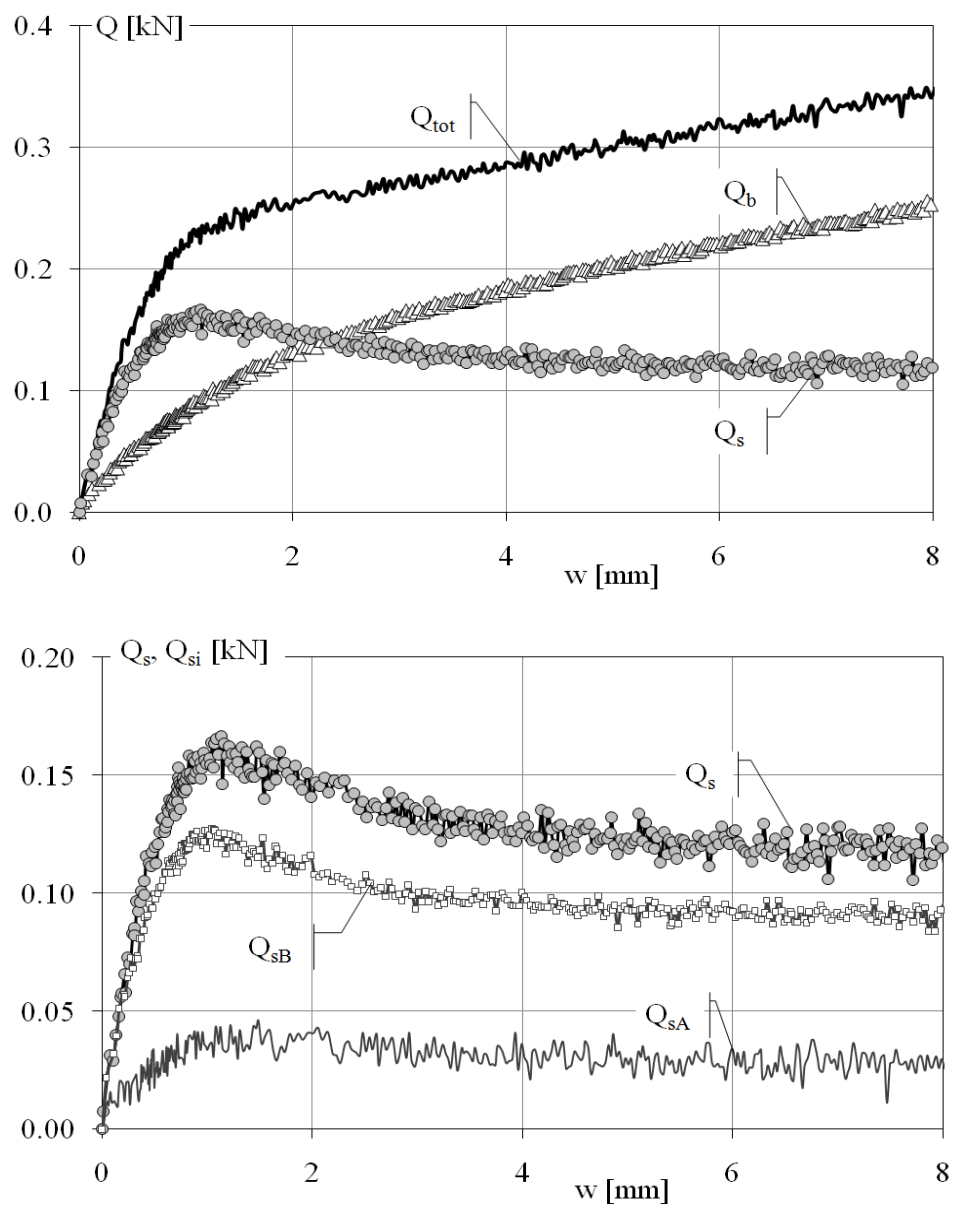
| SPC_8_MD_160       |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |                                     | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|-------------------------------------|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |                                     | 6.6   | 88                   | 40                   | -31                |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |                                     | 20    | 277                  | 126                  | 41                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |                                     |       |                      |                      |                    |
| 160                | 167                | 8              | 160            | 58              | 0.093           | 1.4            |   |                                     |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |       |                      |                      |                    |





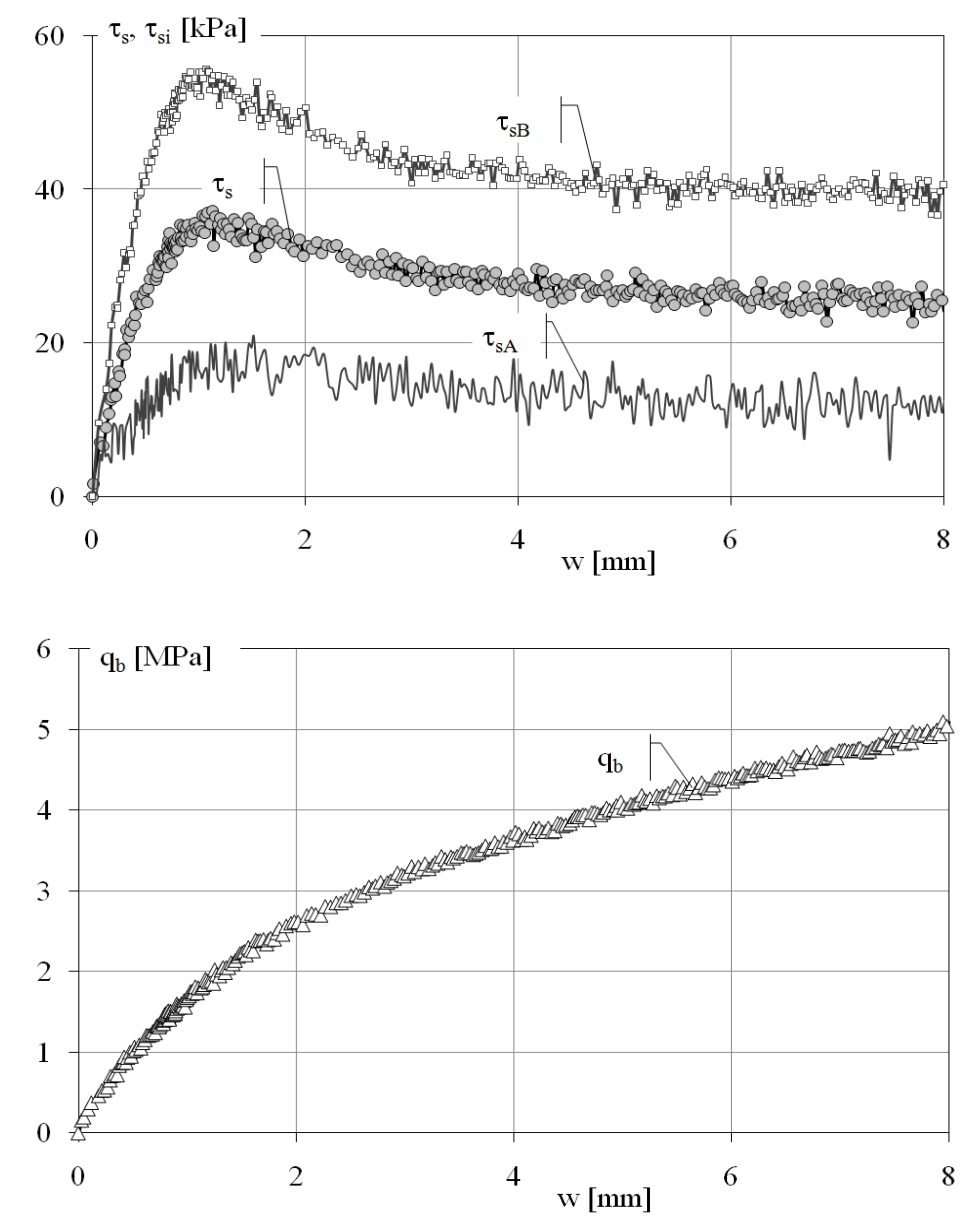
| SPC_8_MD_160       |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$<br>[kPa] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{res}$<br>[kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 6.6   | 88                      | 40                      | -31                   |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   | 20    | 277                     | 126                     | 41                    |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   |       |                         |                         |                       |
| 160                | 167                | 8              | 160            | 58              | 0.093           | 1.4            | B |   |       |                         |                         |                       |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$   |       |                         |                         |                       |



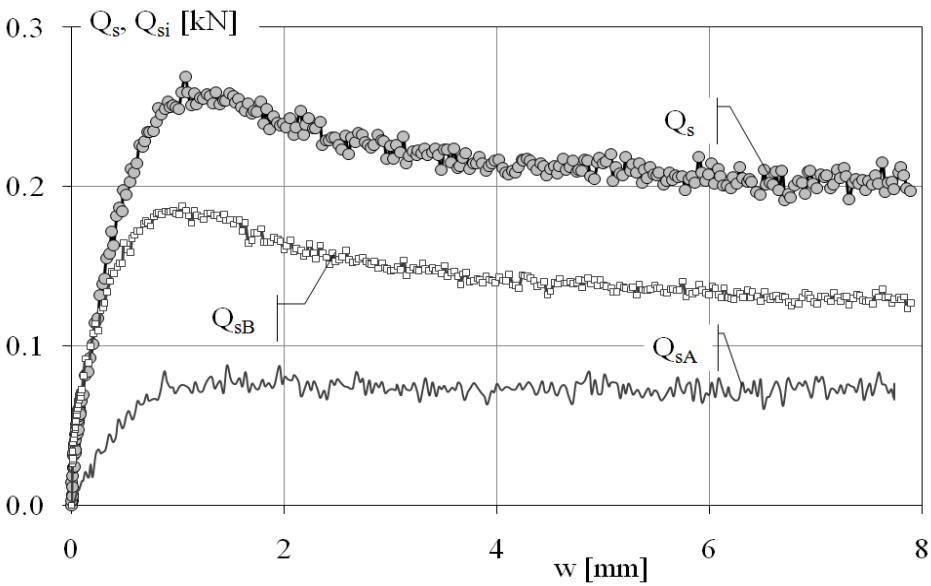
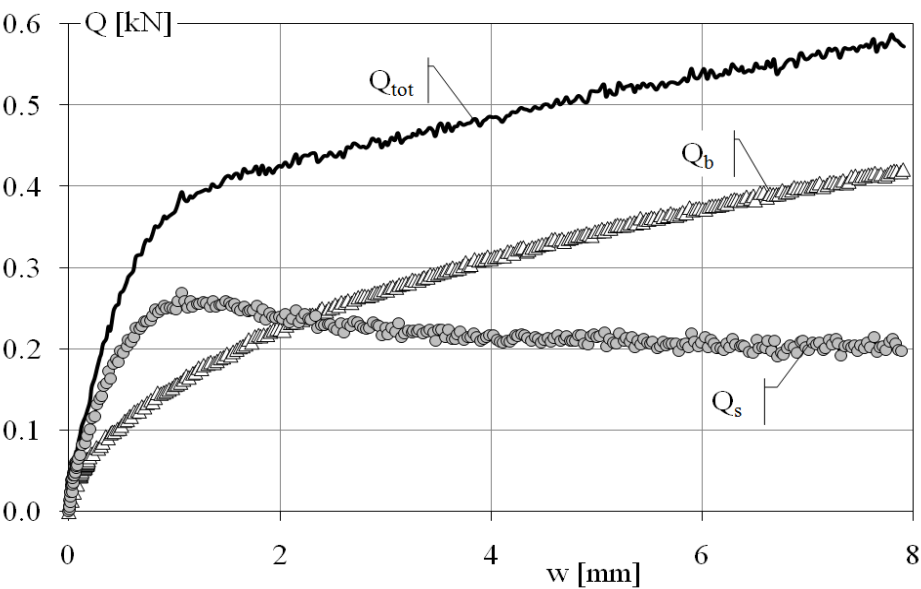
| SPC_8_HD_30        |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A   |  | 1.2   | 18                   | 8                    | -7                 |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   | 3.8   | 55                   | 25                   | 9                  |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   |       |                      |                      |                    |
| 30                 | 32                 | 8              | 160            | 82              | 0.093           | 1.4            |   |   |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                | k <sub>0</sub> = 1-senφ' <sub>cv</sub> =0.455 |   |       |                      |                      |                    |




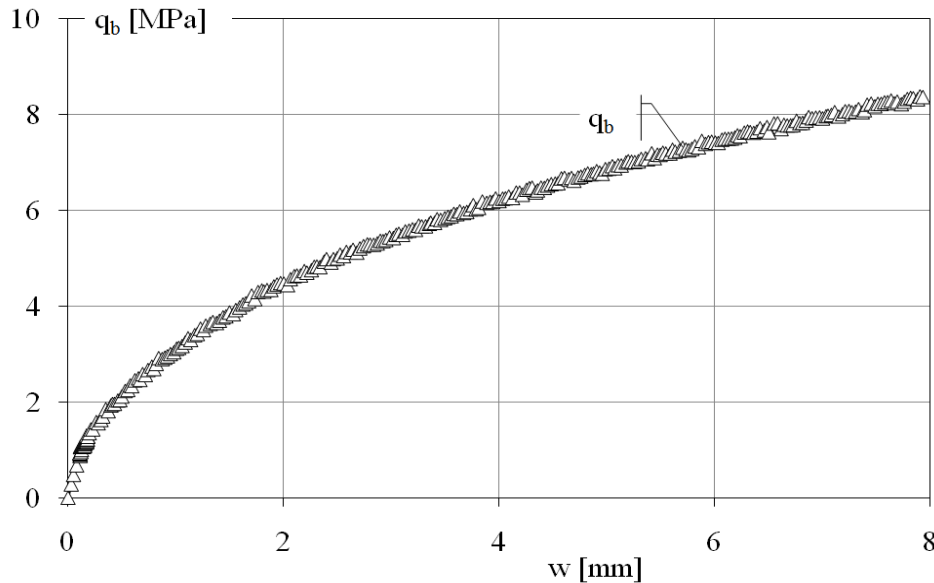
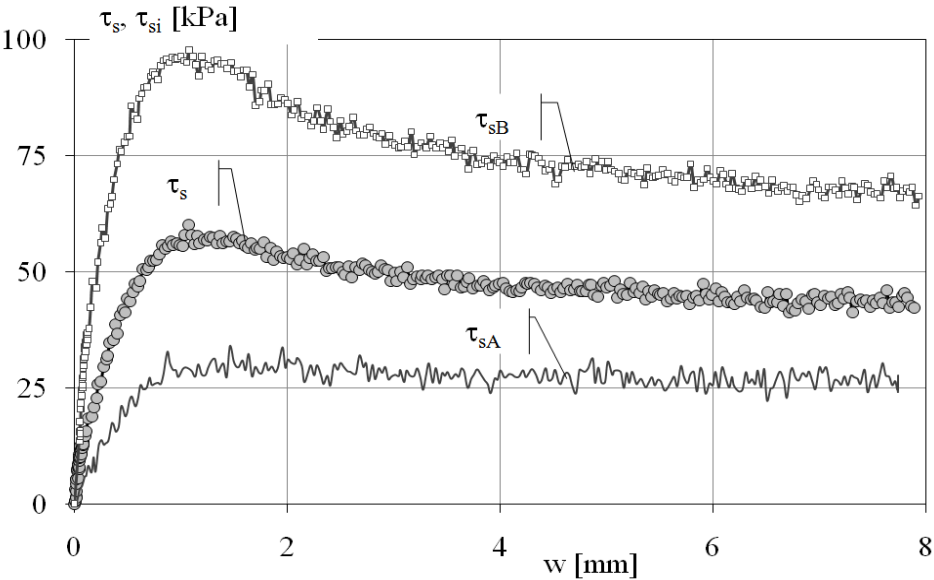
| SPC_8_HD_30        |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$<br>[kPa] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{res}$<br>[kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 1.2   | 18                      | 8                       | -7                    |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   | 3.8   | 55                      | 25                      | 9                     |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            | B |  |       |                         |                         |                       |
| 30                 | 32                 | 8              | 160            | 82              | 0.093           | 1.4            |   |   |       |                         |                         |                       |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   | k <sub>0</sub> = 1-senφ' <sub>cv</sub> =0.455                                     |       |                         |                         |                       |





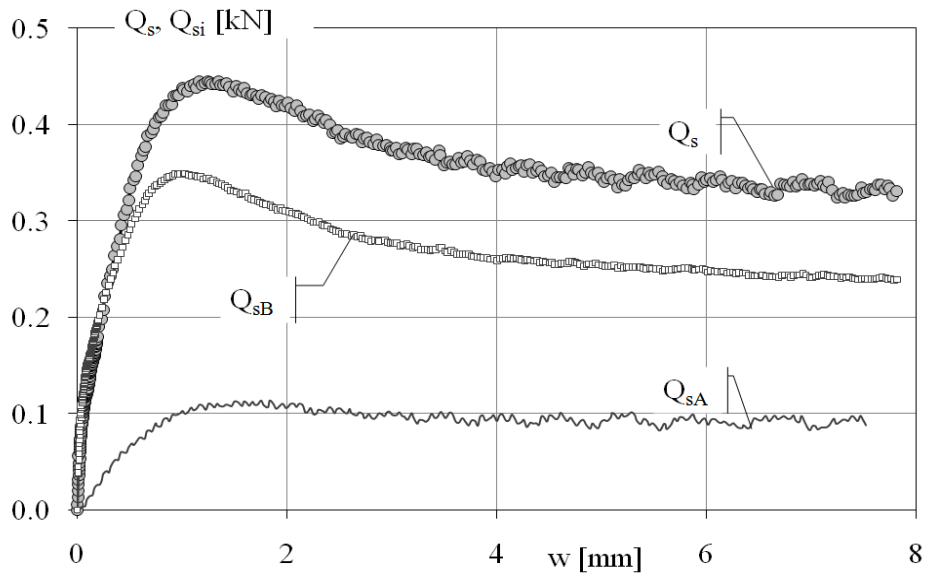
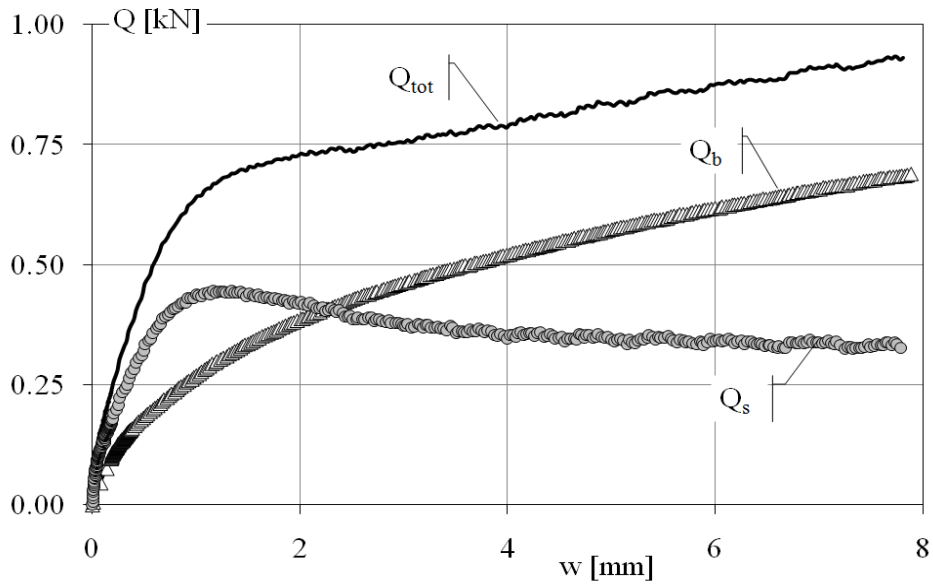
| SPC_8_HD_60                         |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |  | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|-------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|--|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato                  |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 2.9   | 42                   | 19                   | -11                |
| a/g                                 | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |  | 8.0   | 119                  | 54                   | 15                 |
| [-]                                 | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |  |       |                      |                      |                    |
| 60                                  | 64                 | 8              | 160            | 82              | 0.093           | 1.4            |   |  |       |                      |                      |                    |
| $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                    |                |                |                 |                 |                |   |  |       |                      |                      |                    |



| SPC_8_HD_60        |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 2.9   | 42                   | 19                   | -11                |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |   | 8.0   | 119                  | 54                   | 15                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   |       |                      |                      |                    |
| 60                 | 64                 | 8              | 160            | 82              | 0.093           | 1.4            |   |   |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$   |       |                      |                      |                    |

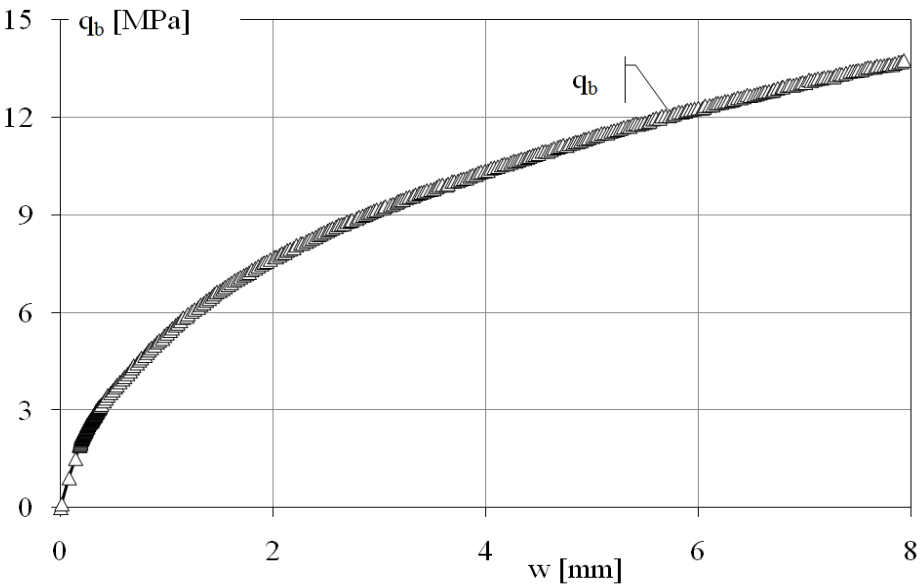
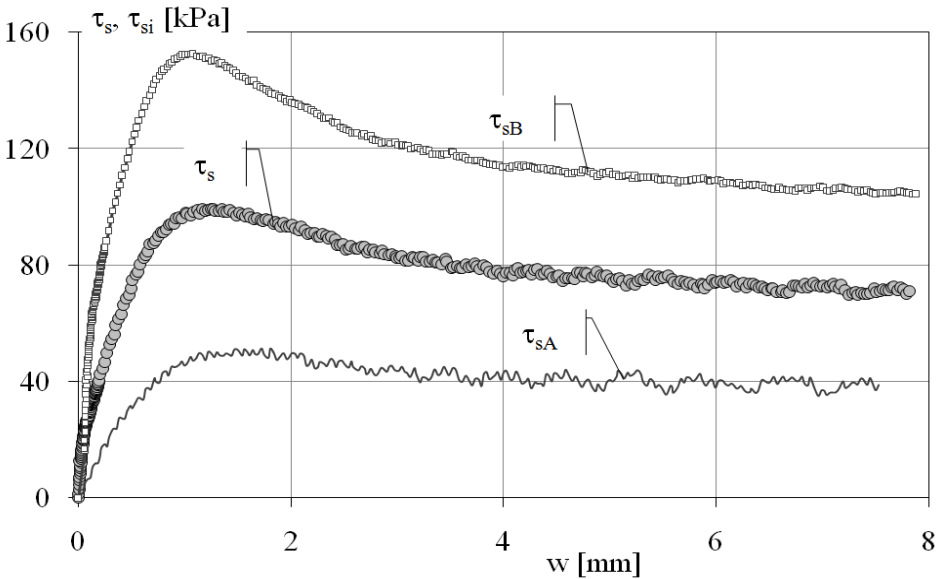


| SPC_8_HD_120       |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |   | z [m]   | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|---|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 4.9   | 70                   | 32                   | -18                |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   | 15.1  | 222                  | 101                  | 16                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   | k <sub>0</sub> = 1-senϕ' <sub>cv</sub> =0.455 |                      |                      |                    |
| 120                | 128                | 8              | 160            | 83              | 0.093           | 1.4            | B |  |   |                      |                      |                    |

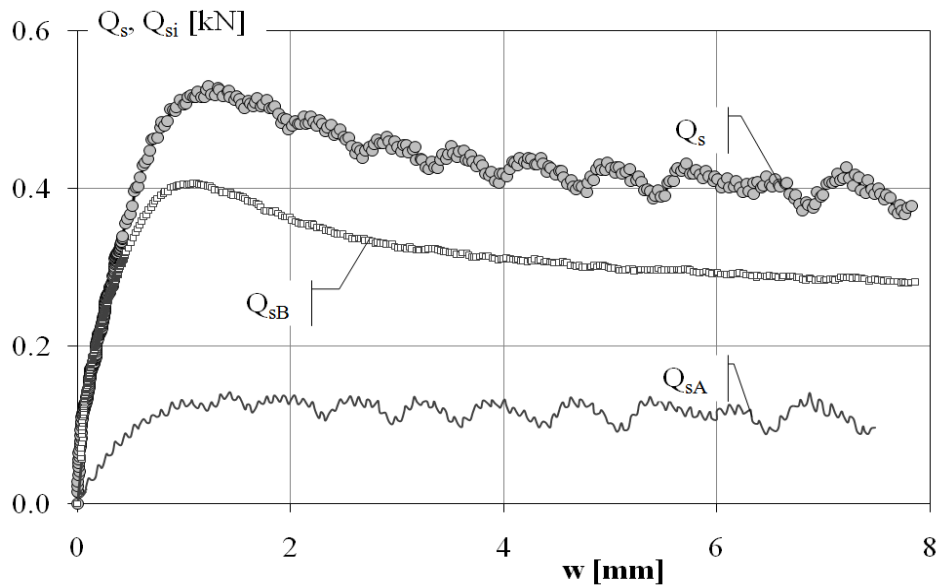
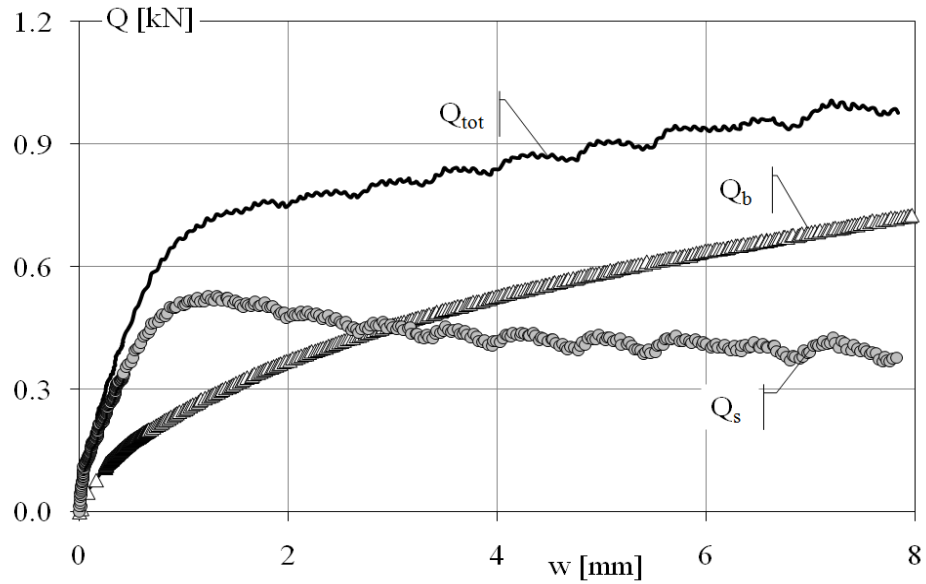




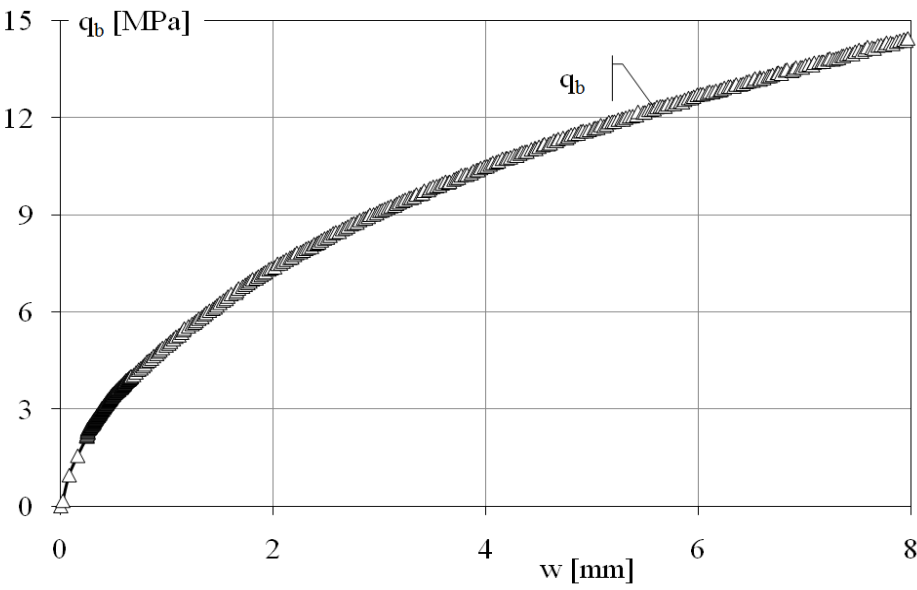
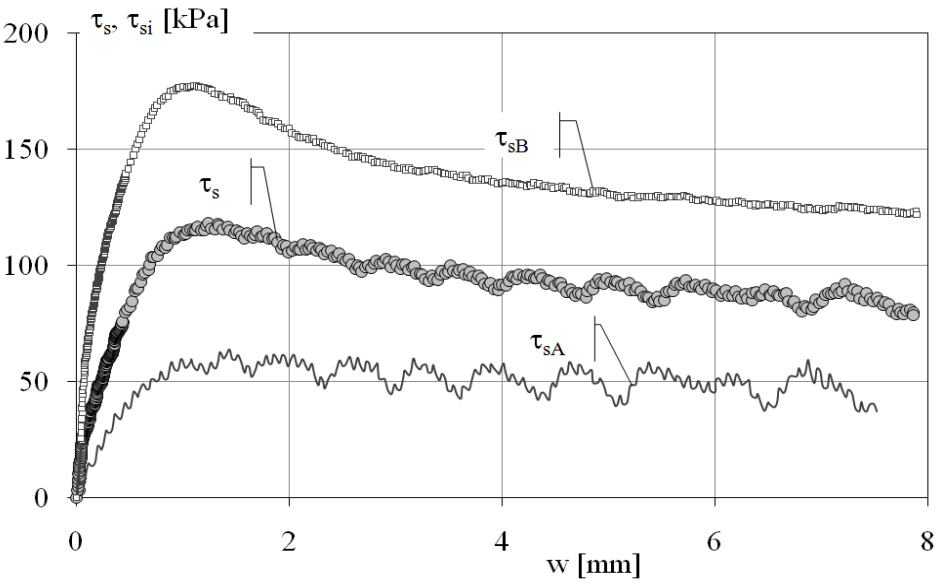
| SPC_8_HD_120       |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |                                     | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|-------------------------------------|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |                                     | 4.9   | 70                   | 32                   | -18                |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |                                     | 15.1  | 222                  | 101                  | 16                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |                                     |       |                      |                      |                    |
| 120                | 128                | 8              | 160            | 83              | 0.093           | 1.4            | B |                                     |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |       |                      |                      |                    |



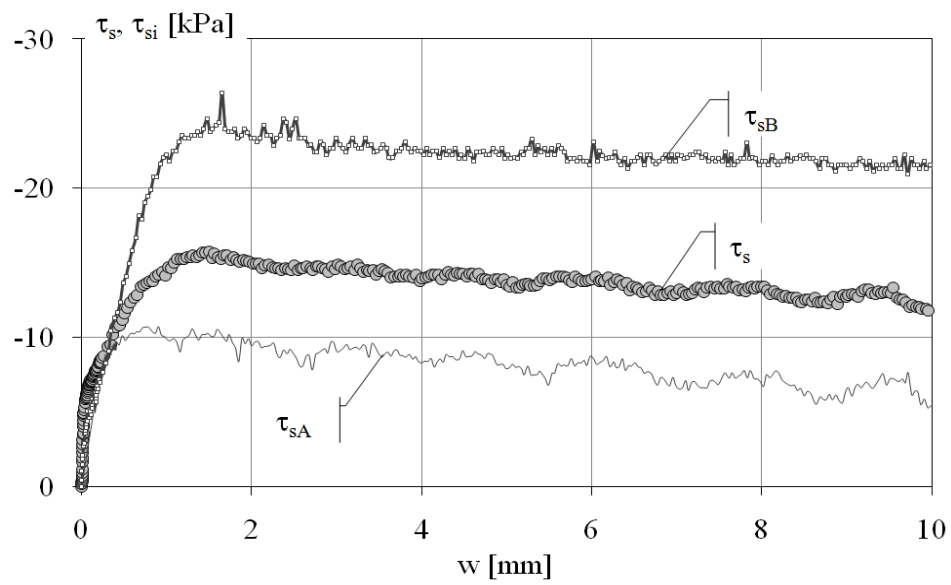
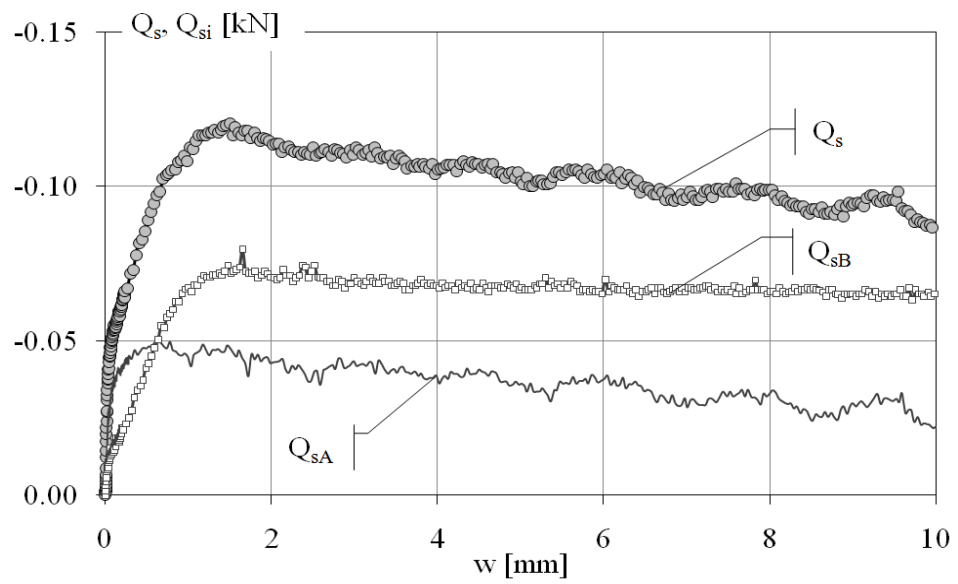
| SPC_8_HD_160       |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |                                     | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|-------------------------------------|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |                                     | 6.4   | 92                   | 42                   | -20                |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |                                     | 19.7  | 290                  | 132                  | 25                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |                                     |       |                      |                      |                    |
| 160                | 167                | 8              | 160            | 83              | 0.093           | 1.4            |   |                                     |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |       |                      |                      |                    |



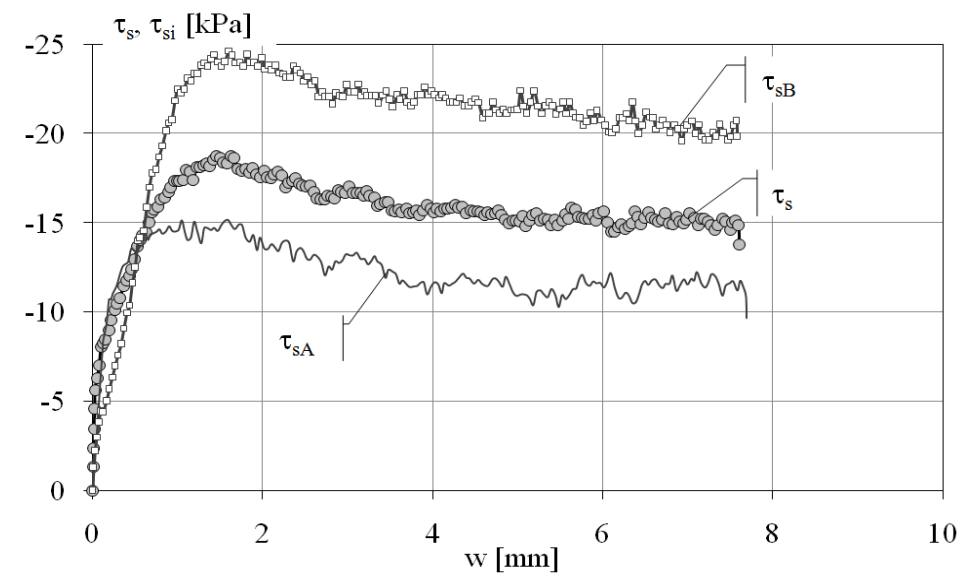
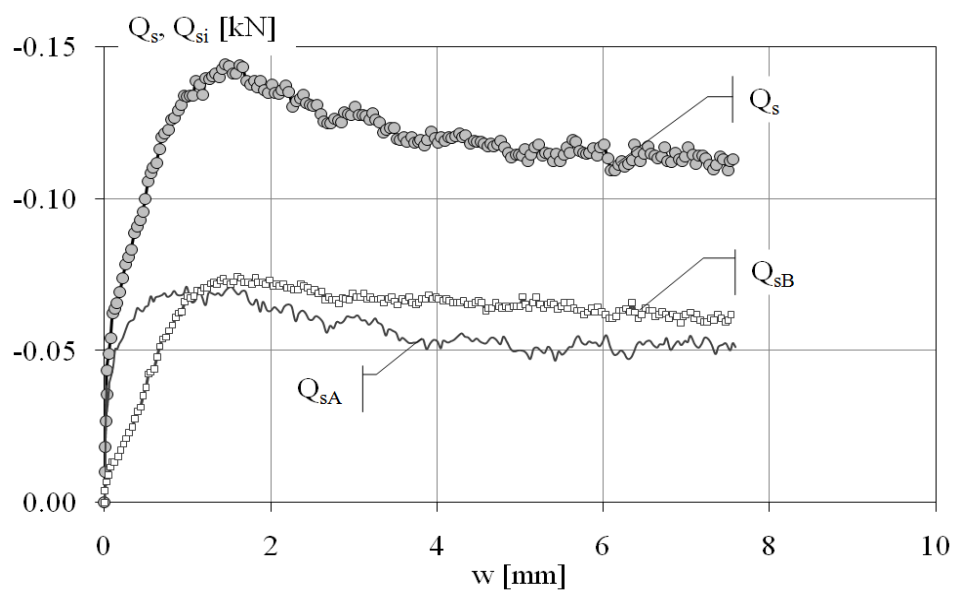
| SPC_8_HD_160       |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |                                     | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|-------------------------------------|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |                                     | 6.4   | 92                   | 42                   | -20                |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |                                     | 19.7  | 290                  | 132                  | 25                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |                                     |       |                      |                      |                    |
| 160                | 167                | 8              | 160            | 83              | 0.093           | 1.4            |   |                                     |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |       |                      |                      |                    |




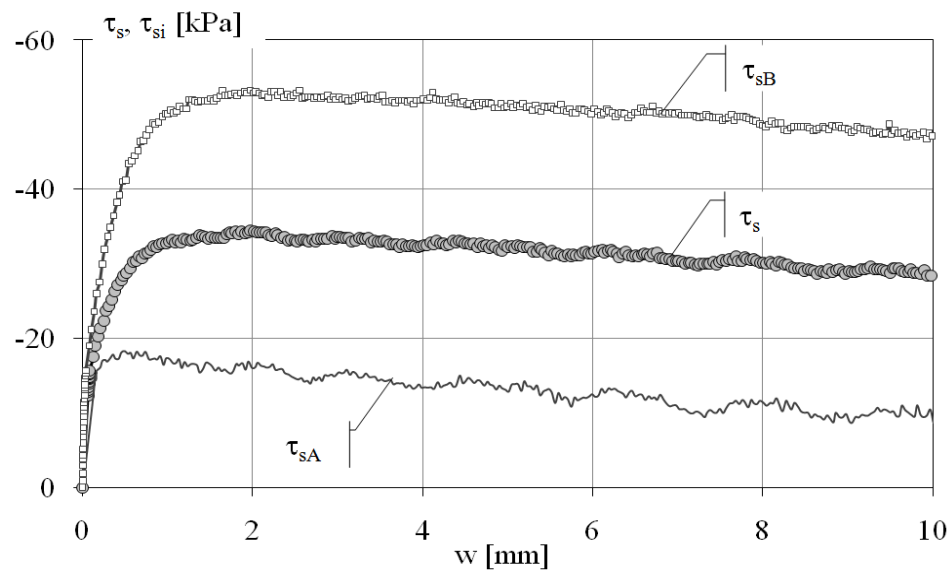
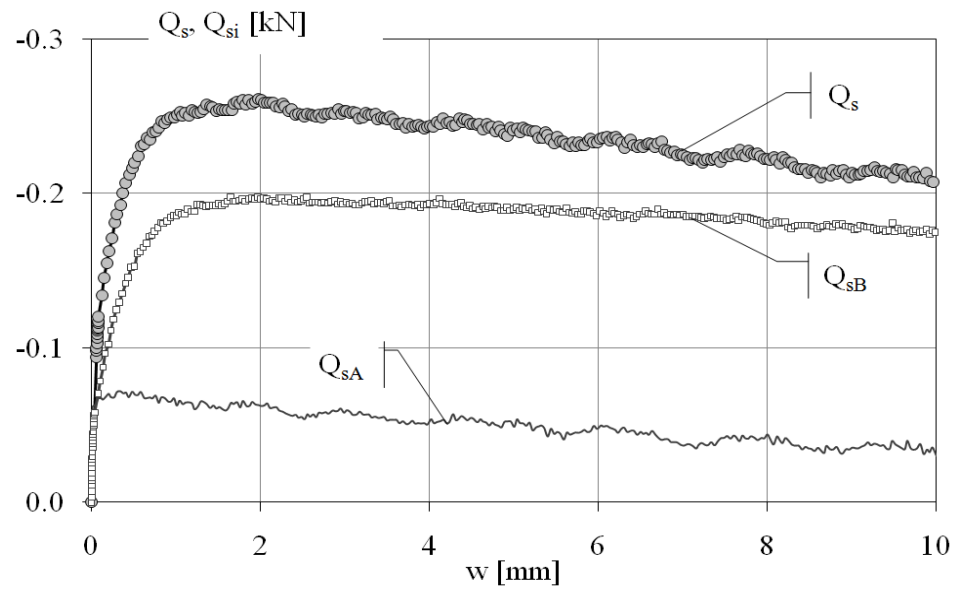
| PT1_FF32           |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   |  | z [m] | $\sigma'_{v0}$<br>[kPa]             | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{res}$<br>[kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|--|-------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 2.2   | 29                                  | 13                      | -6                    |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |  | 5.9   | 81                                  | 37                      | 20                    |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |  |       |                                     |                         |                       |
| 30                 | 33                 | 10             | 245            | 43              | 0.093           | 1.07           |   |  |       |                                     |                         |                       |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   |  |       | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                         |                       |




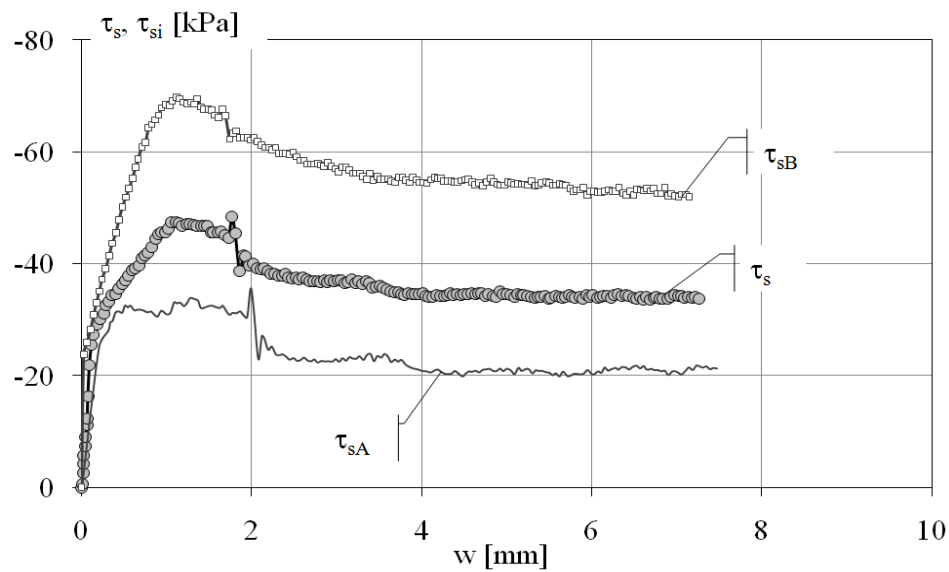
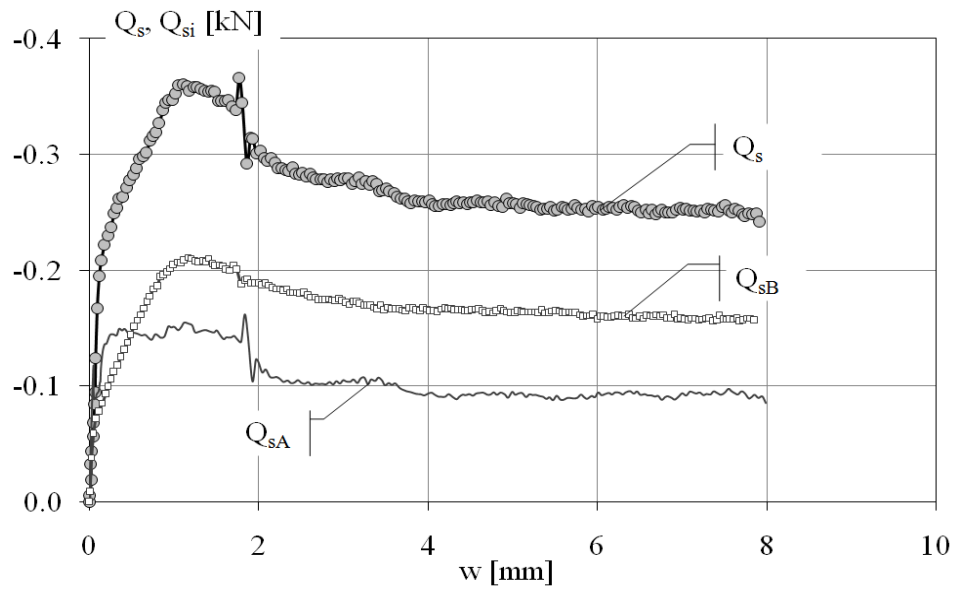
| PT1_FF45           |                    |                |                 | Trazione       |                 |                |                                     | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-------------------------------------|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    | strum.         | Sabbia FF secca |                |                 |                |                                     | 2.2   | 29                   | 13                   | -8                 |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub>  | D <sub>R</sub> | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |                                     | 5.8   | 81                   | 37                   | 18                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]            | [%]            | [mm]            | [-]            |                                     |       |                      |                      |                    |
| 30                 | 32                 | 10             | 245             | 43             | 0.093           | 1.07           |                                     |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                 |                |                 |                | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |       |                      |                      |                    |




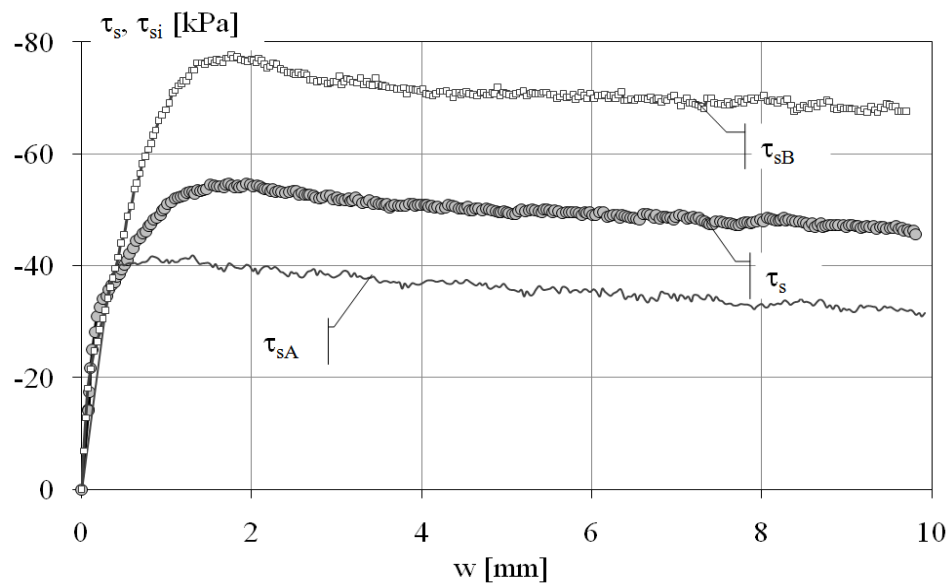
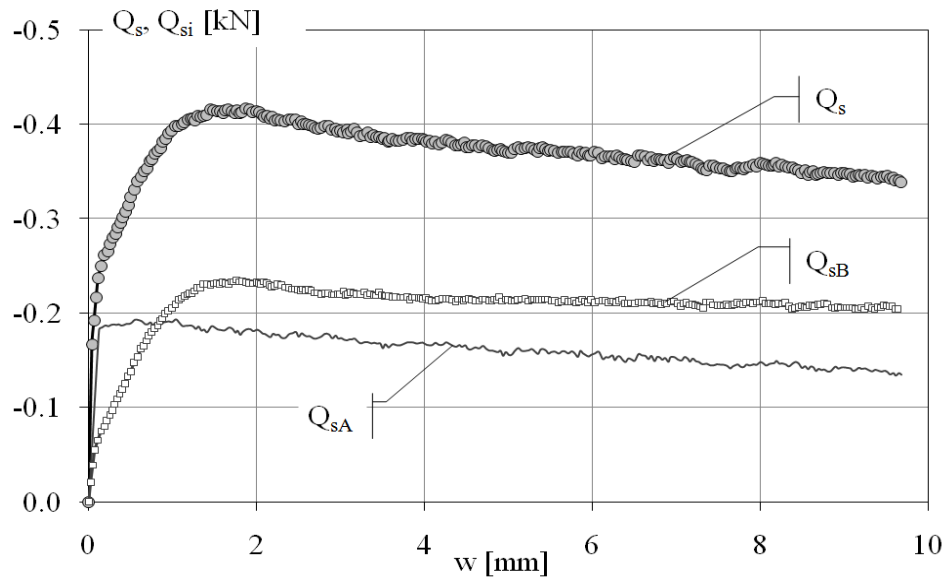
| PT1_FF38           |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   |   | z [m]                              | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|------------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 4.9                                | 66                   | 30                   | -12                |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   | 14.5                               | 202                  | 92                   | 25                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   | $k_0 = 1 - \sin\phi'_{cv} = 0.455$ |                      |                      |                    |
| 80                 | 86                 | 10             | 245            | 51              | 0.093           | 1.07           | B |   |                                    |                      |                      |                    |




| PT1_FF44                            |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|-------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato                  |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 5.8   | 77                   | 35                   | -25                |
| a/g                                 | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   |       |                      |                      |                    |
| [-]                                 | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   |       |                      |                      |                    |
| 80                                  | 86                 | 10             | 245            | 46              | 0.093           | 1.07           | B |   | 15.3  | 215                  | 98                   | 53                 |
| $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                    |                |                |                 |                 |                |   |   |       |                      |                      |                    |

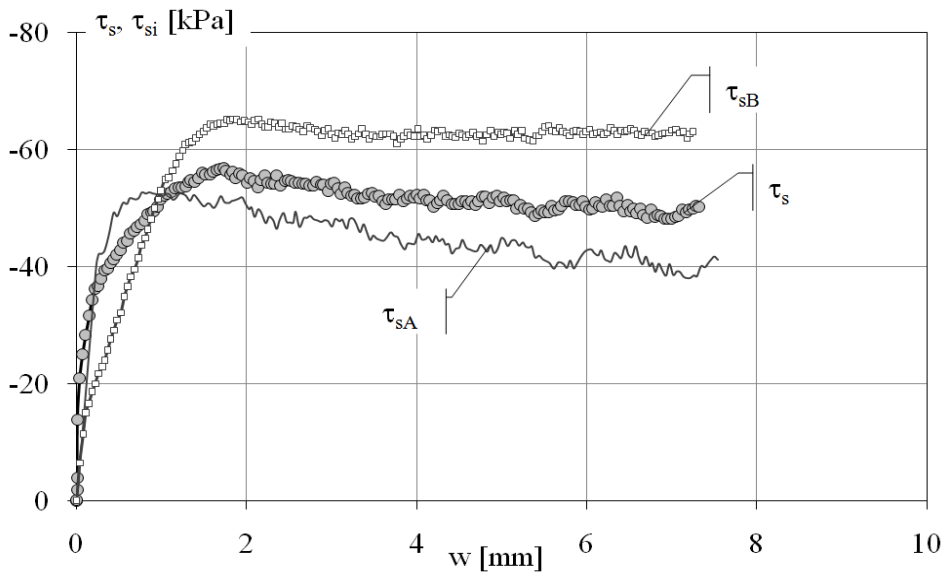
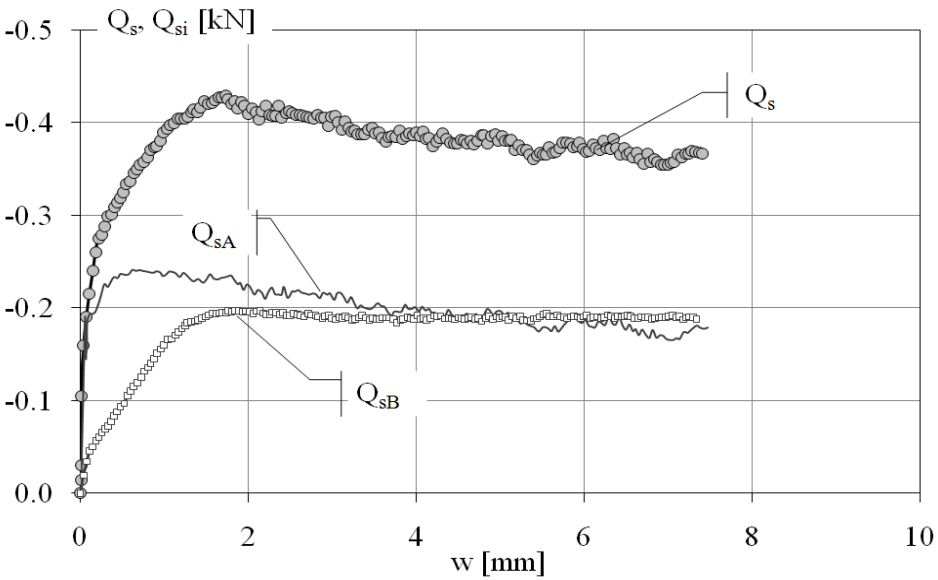



| PT1_FF31           |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   |   | z [m]                            | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|----------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 9.4                              | 130                  | 59                   | -32                |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   | 25                               | 358                  | 163                  | 97                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   |                                  |                      |                      |                    |
| 130                | 139                | 10             | 245            | 55              | 0.093           | 1.07           |   |   |                                  |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   |   | k <sub>0</sub> = 1-senφ'cv=0.455 |                      |                      |                    |

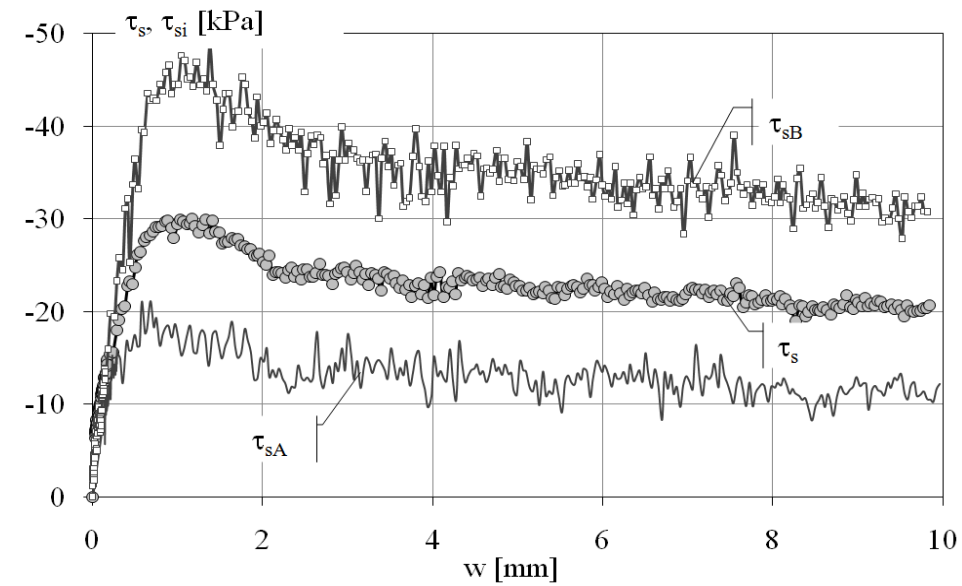
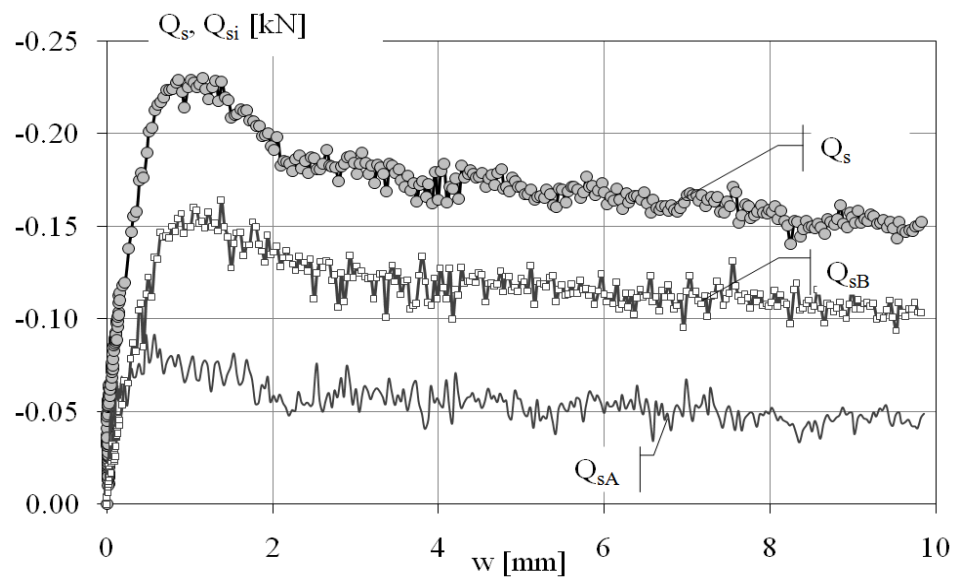





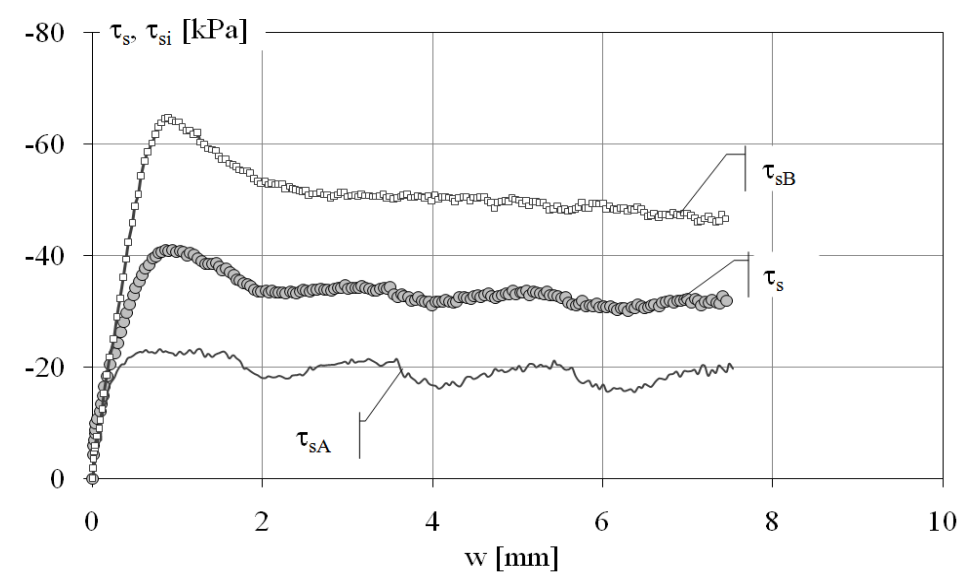
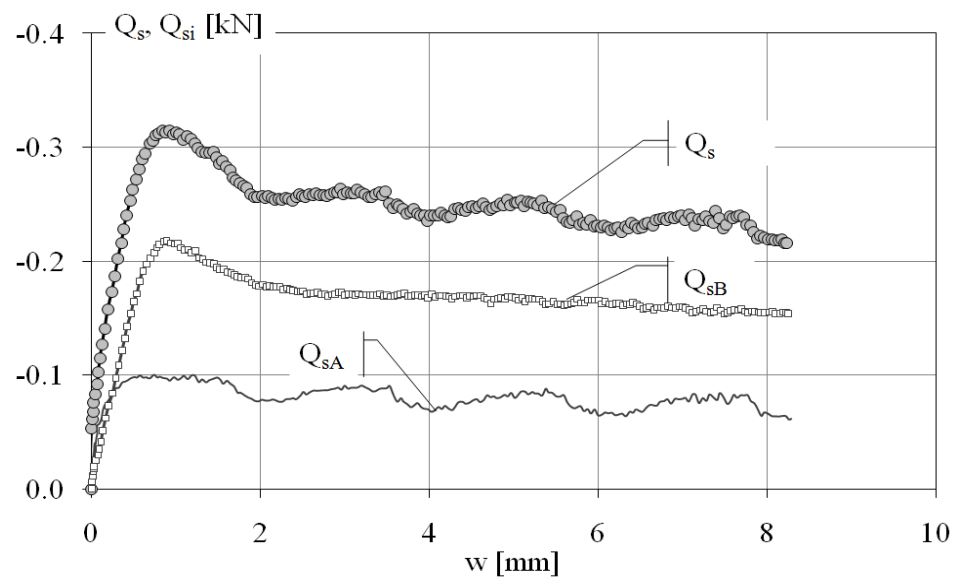
| PT1_FF43           |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   |   | z [m]                               | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 9.3                                 | 125                  | 57                   | -41                |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   | 24.8                                | 345                  | 157                  | 92                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   |                                     |                      |                      |                    |
| 130                | 139                | 10             | 245            | 45              | 0.093           | 1.07           |   |   |                                     |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   |   | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                      |                      |                    |




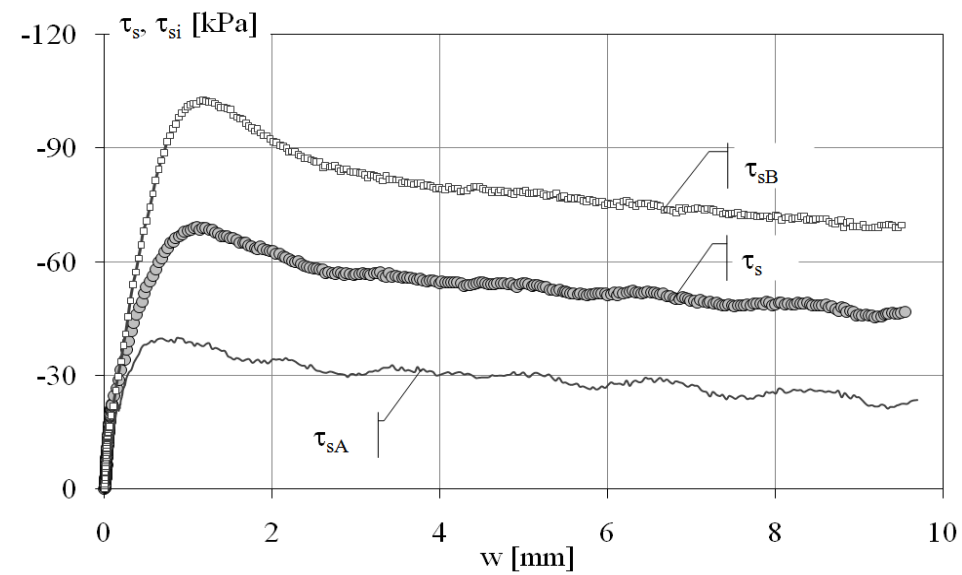
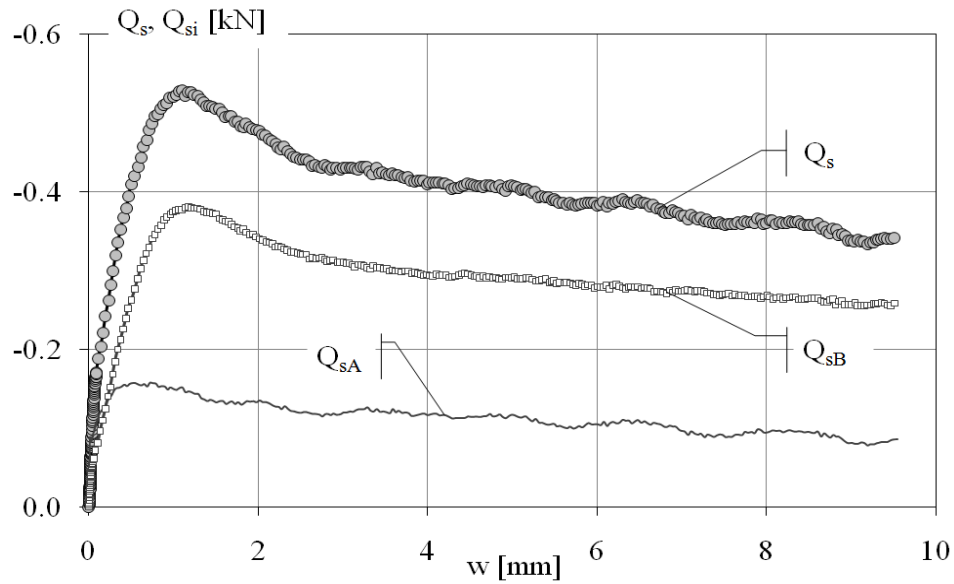
| PT1_FF29           |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   |  | z [m]                               | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |  |  |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|--|-------------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|--|--|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                |  |  | 2.1                                 | 31                   | 14                   | -10                |  |  |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |  | 5.7                                 | 86                   | 39                   | 8                  |  |  |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |  | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                      |                      |                    |  |  |
| 30                 | 33                 | 10             | 245            | 76              | 0.093           | 1.07           |   |  |                                     |                      |                      |                    |  |  |




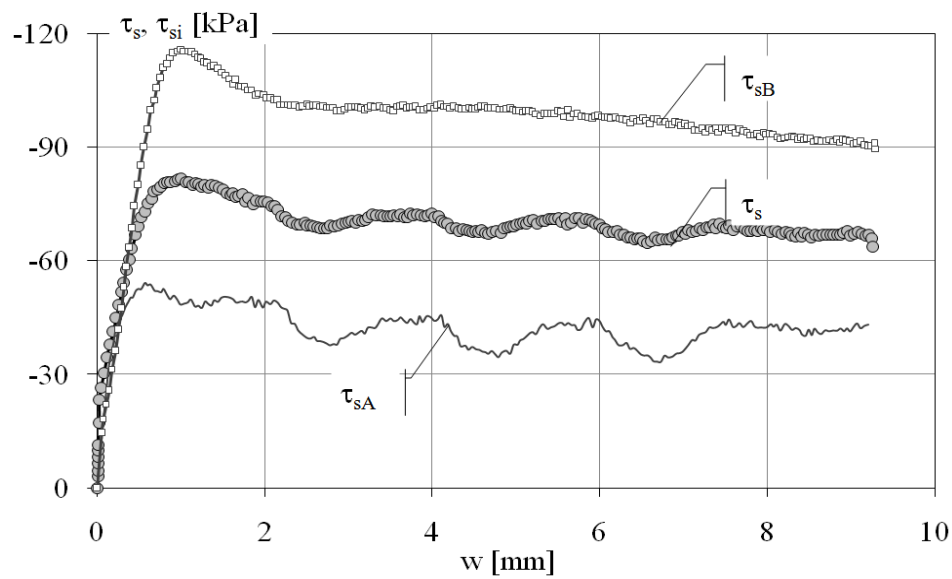
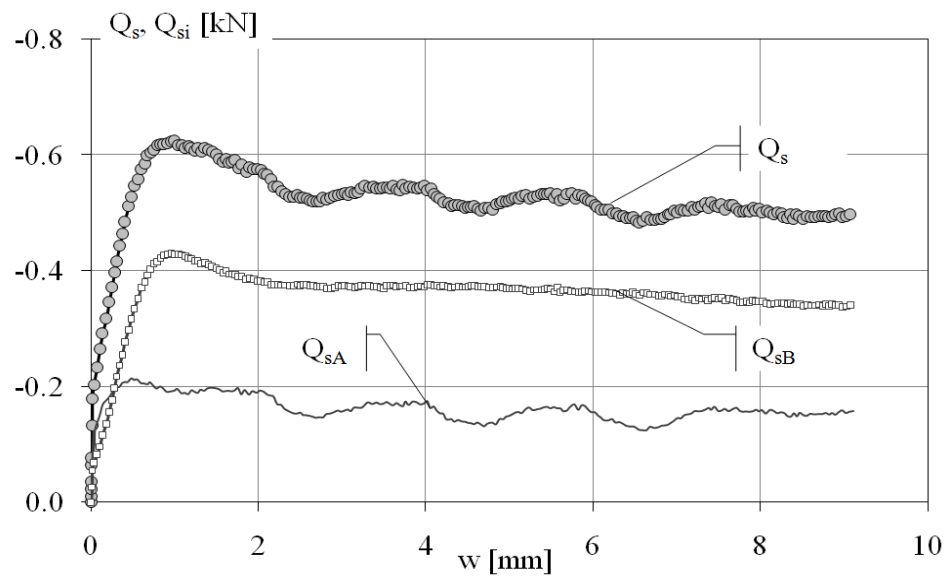
| PT1_FF47           |                    |                |                | Trazione        |                 |                |                                     |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |  |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------------------------|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|--|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A                                   |  | 2.0   | 29                   | 13                   | -9                 |  |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |                                     |   | 5.7   | 86                   | 39                   | 16                 |  |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |                                     |   |       |                      |                      |                    |  |
| 30                 | 32                 | 10             | 245            | 76              | 0.093           | 1.07           | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |   |       |                      |                      |                    |  |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |                                     |   |       |                      |                      |                    |  |




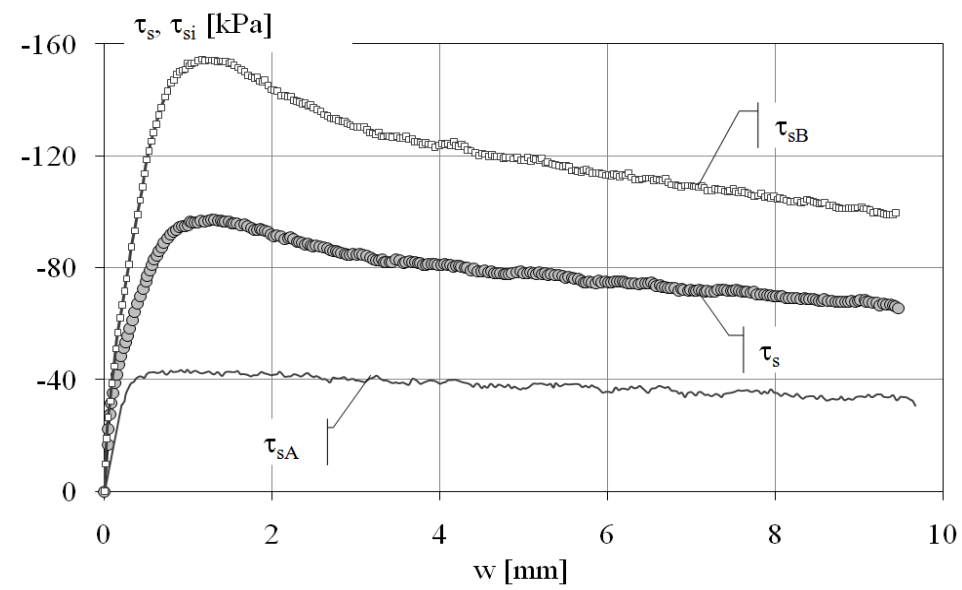
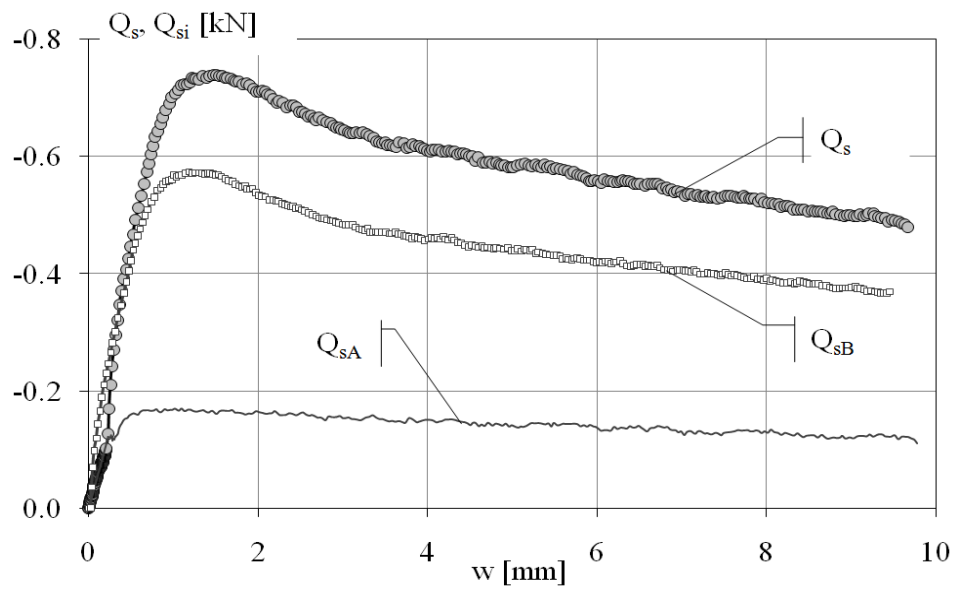
| PT1_FF33           |                    |                |                | Trazione        |                 |                |                                     |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |  |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------------------------|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|--|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A                                   |  | 5.0   | 73                   | 33                   | -22                |  |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |                                     |   | 14.6  | 220                  | 100                  | 23                 |  |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |                                     |   |       |                      |                      |                    |  |
| 80                 | 86                 | 10             | 245            | 83              | 0.093           | 1.07           | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |   |       |                      |                      |                    |  |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |                                     |   |       |                      |                      |                    |  |




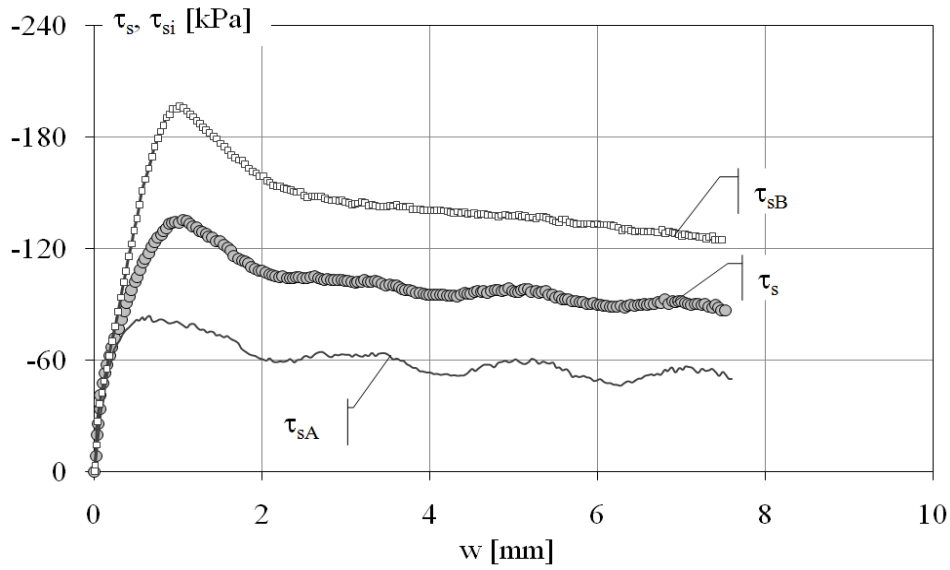
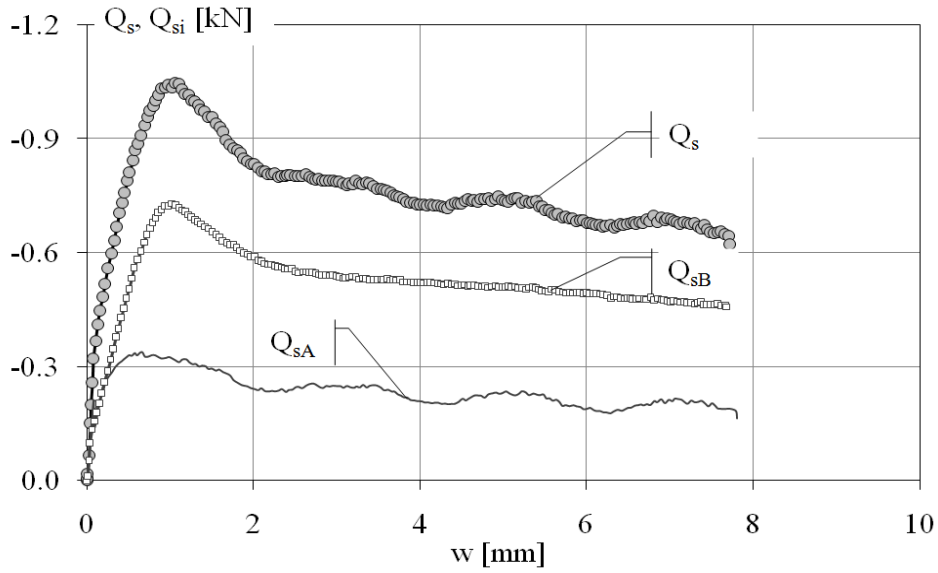
| PT1_FF42           |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   |   | z [m]                               | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 5.0                                 | 73                   | 33                   | -30                |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   | 14.6                                | 220                  | 100                  | 41                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                      |                      |                    |
| 80                 | 86                 | 10             | 245            | 76              | 0.093           | 1.07           | B |   |                                     |                      |                      |                    |



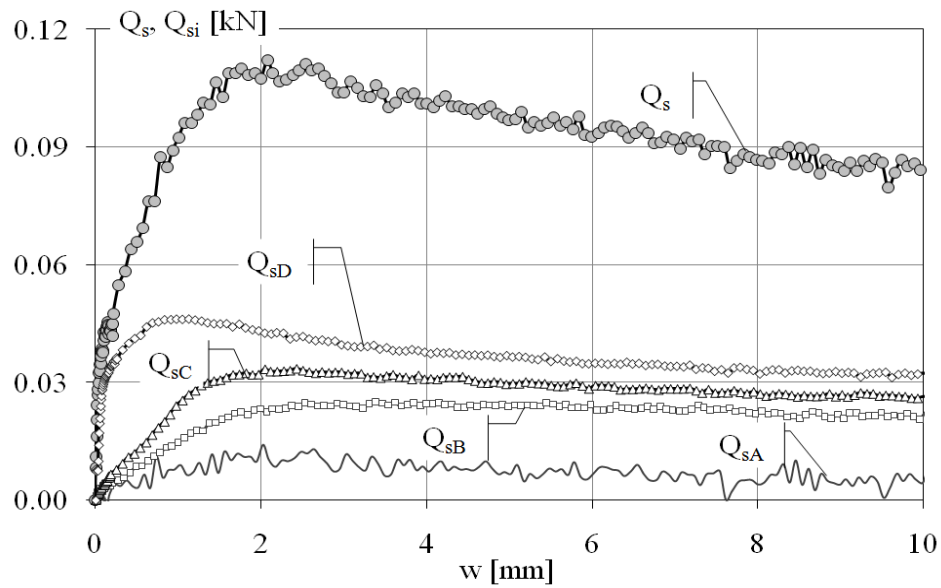
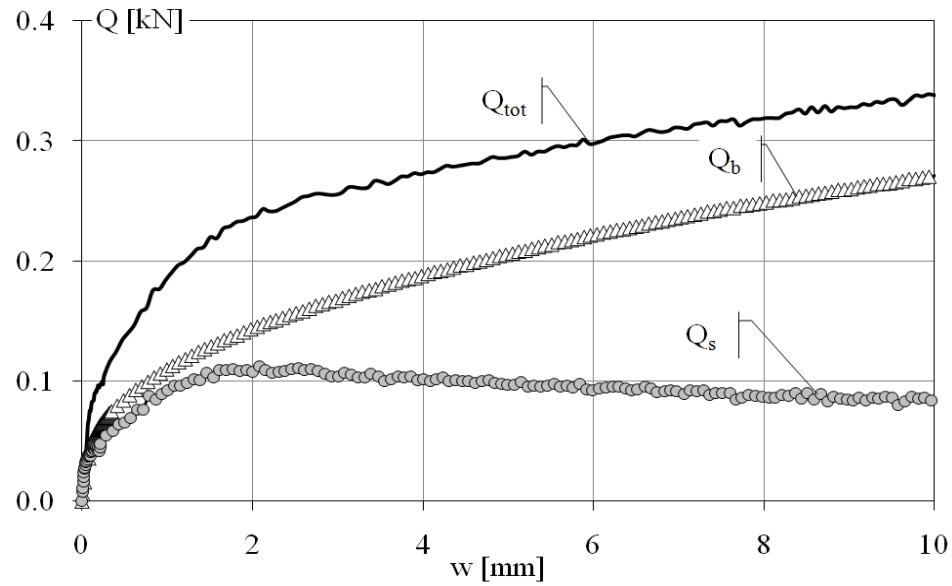
| PT1_FF30           |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   |   | z [m]                            | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|----------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 8.0                              | 116                  | 53                   | -33                |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   | 23.5                             | 358                  | 163                  | 44                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   |                                  |                      |                      |                    |
| 130                | 139                | 10             | 245            | 86              | 0.093           | 1.07           |   |   |                                  |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   |   | k <sub>0</sub> = 1-senφ'cv=0.455 |                      |                      |                    |



| PT1_FF46           |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A   |  | 8.3   | 119                  | 54                   | -51                |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   |       |                      |                      |                    |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   |       |                      |                      |                    |
| 130                | 139                | 10             | 245            | 75              | 0.093           | 1.07           |   |   |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                | B   |   | 24.0  | 363                  | 165                  | 74                 |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                | k <sub>0</sub> = 1-senφ' <sub>cv</sub> =0.455 |   |       |                      |                      |                    |

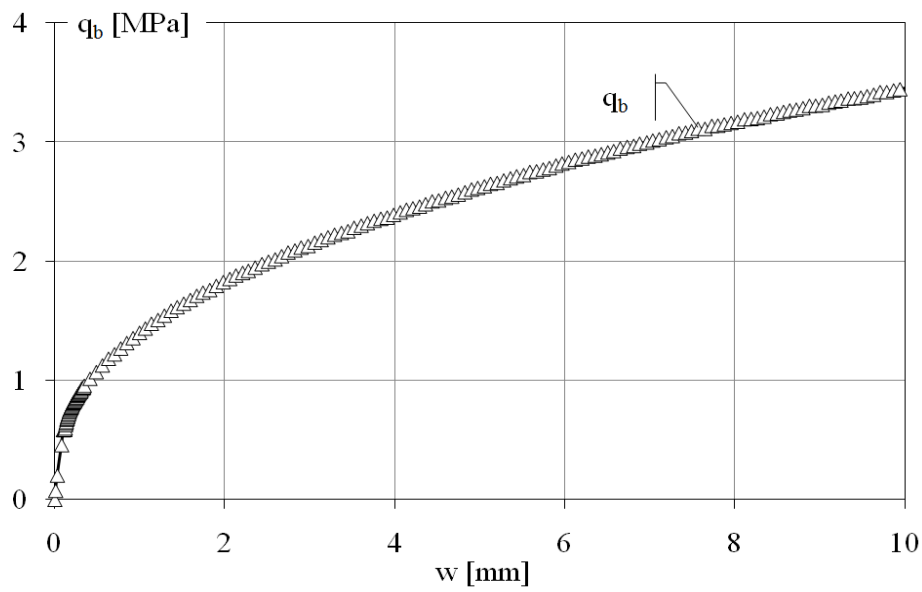
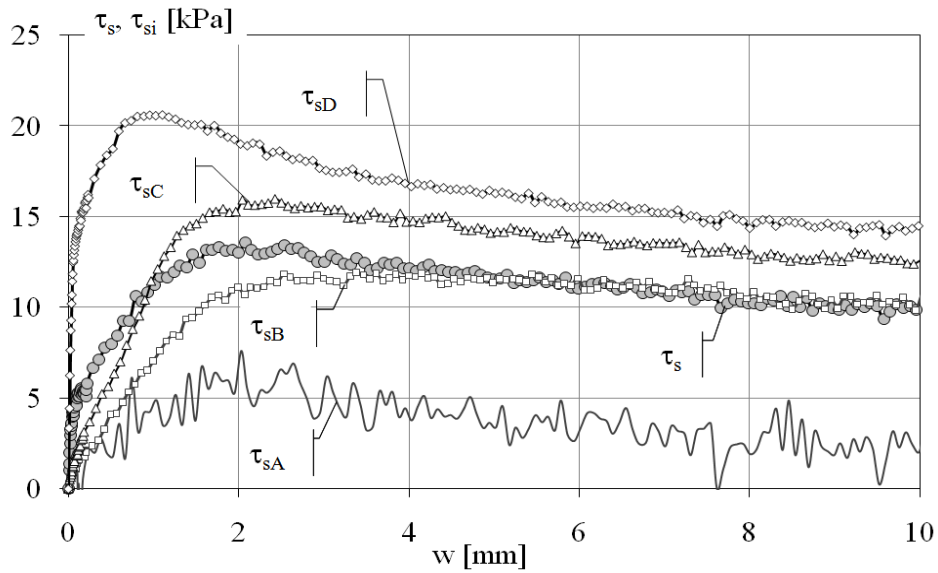


| PT3a_FF1                            |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |  | $z$ [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|-------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|--|---------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato                  |                    | strum.         |                | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 0.8     | 11                   | 5                    | -2                 |
| a/g                                 | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |  | 2.7     | 37                   | 17                   | -4                 |
| [-]                                 | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            | C |  | 4.7     | 66                   | 30                   | -11                |
| 30                                  | 33                 | 10             | 245            | 56              | 0.093           | 1.07           | D |  | 6.7     | 97                   | 44                   | 4                  |
| $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                    |                |                |                 |                 |                |   |  |         |                      |                      |                    |

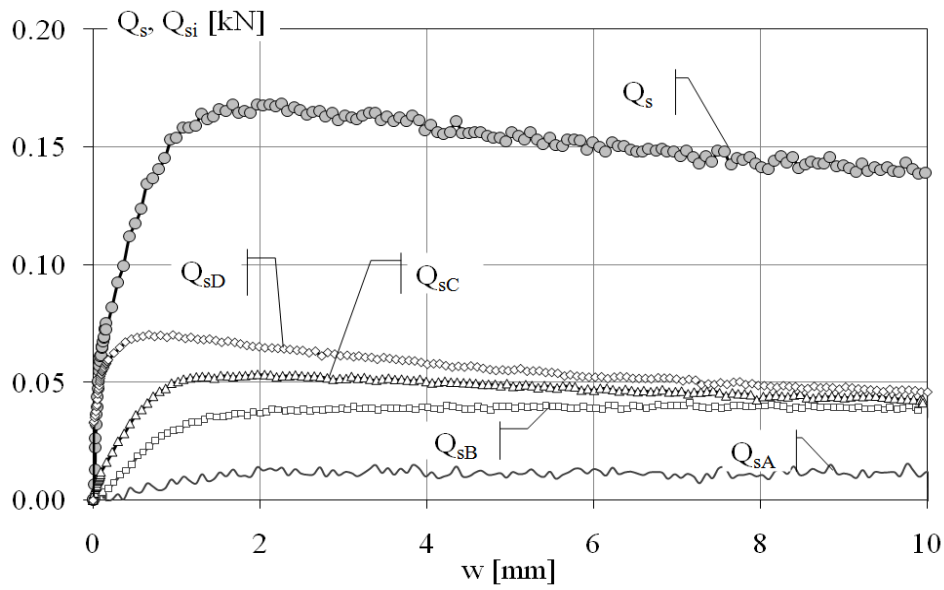
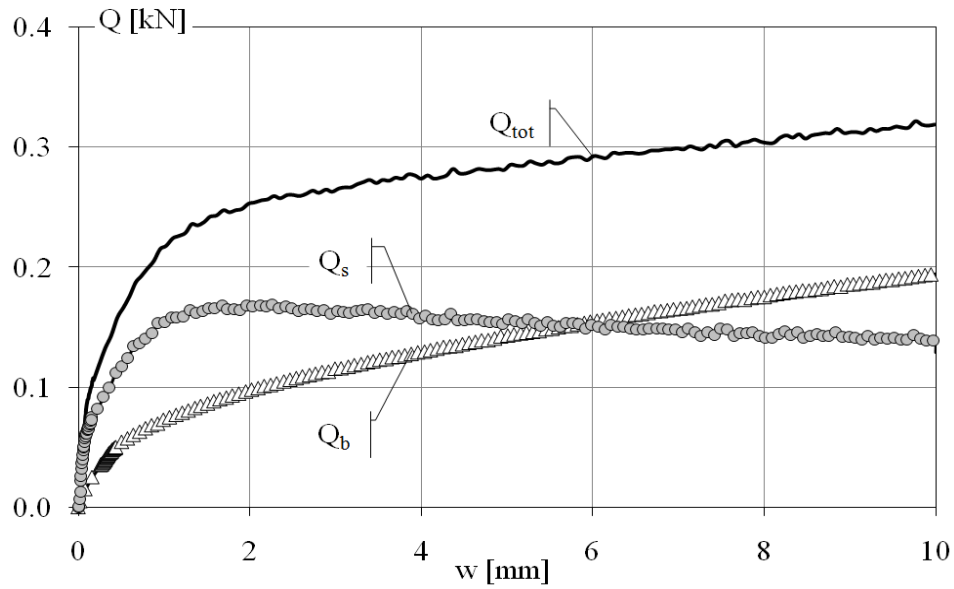




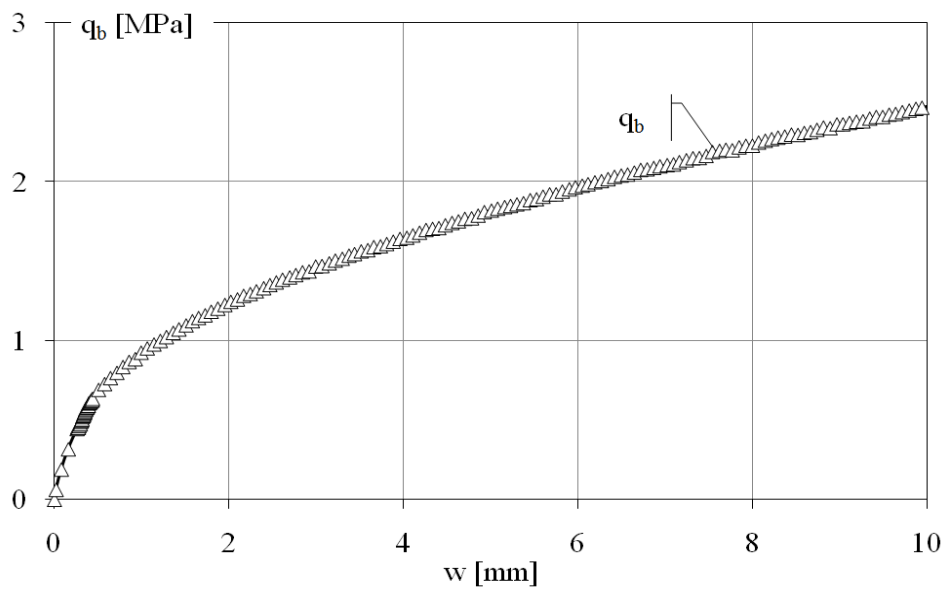
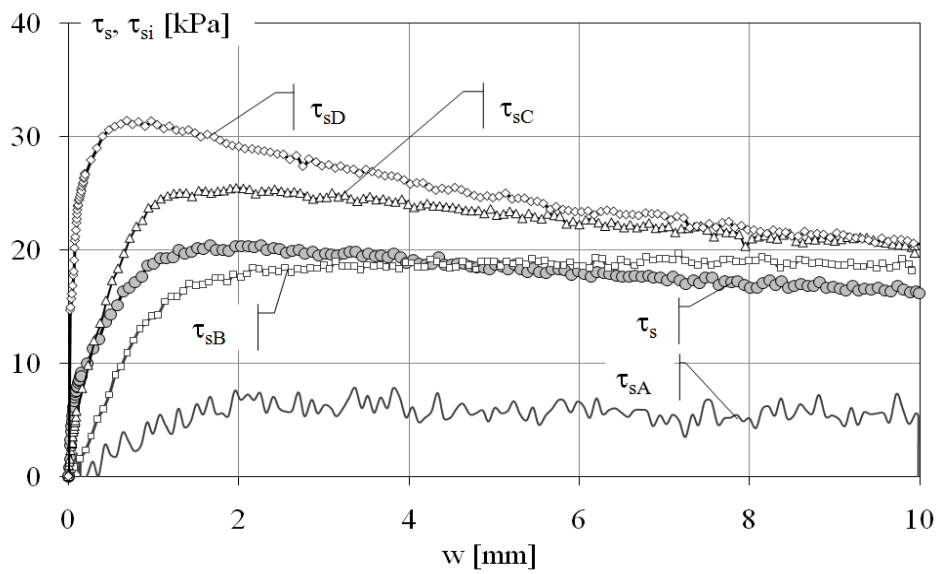
| PT3a_FF1           |                    |                |                | Compressione    |                 |                |                                     |  | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------------------------|--|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    | strum.         |                | Sabbia FF secca |                 |                | A                                   |  | 0.8   | 11                   | 5                    | -2                 |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B                                   |  | 2.7   | 37                   | 17                   | -4                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            | C                                   |  | 4.7   | 66                   | 30                   | -11                |
| 30                 | 33                 | 10             | 245            | 56              | 0.093           | 1.07           | D                                   |  | 6.7   | 97                   | 44                   | 4                  |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |  |       |                      |                      |                    |



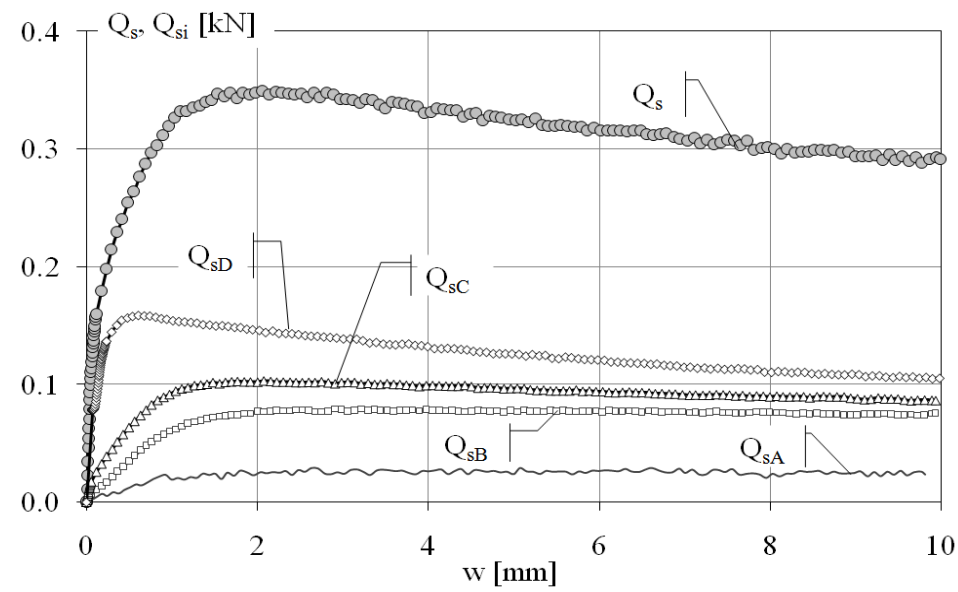
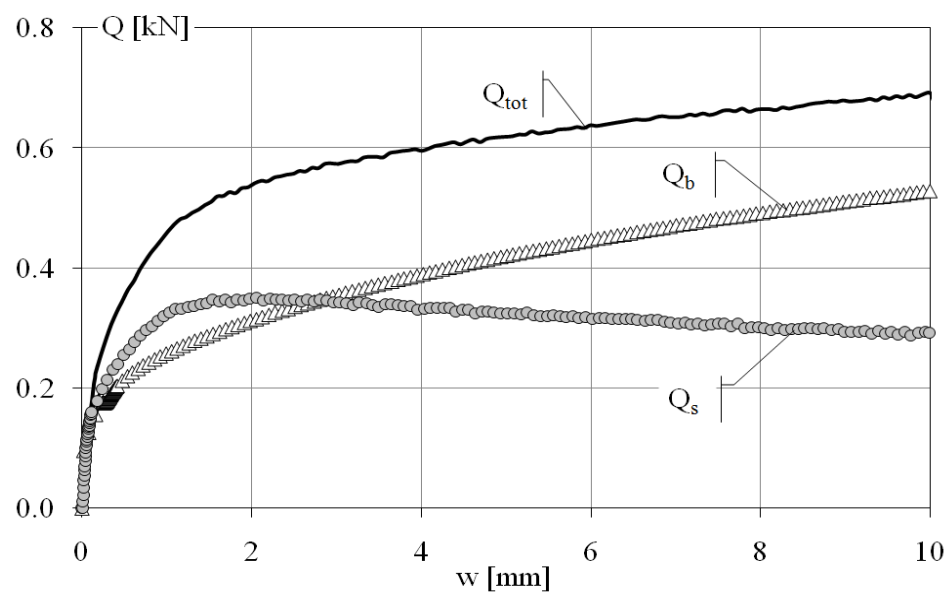
| PT3a_FF7                            |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |  | z [m] | $\sigma'_{v0}$<br>[kPa] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{res}$<br>[kPa] |
|-------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|--|-------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| idealm. trivellato                  |                    | strum.         |                | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 0.8   | 11                      | 5                       | -3                    |
| a/g                                 | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |  | 2.7   | 35                      | 16                      | -8                    |
| [-]                                 | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            | C |  | 4.6   | 64                      | 29                      | -14                   |
| 30                                  | 32                 | 10             | 245            | 44              | 0.093           | 1.07           | D |  | 6.7   | 92                      | 42                      | 15                    |
| $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                    |                |                |                 |                 |                |   |  |       |                         |                         |                       |



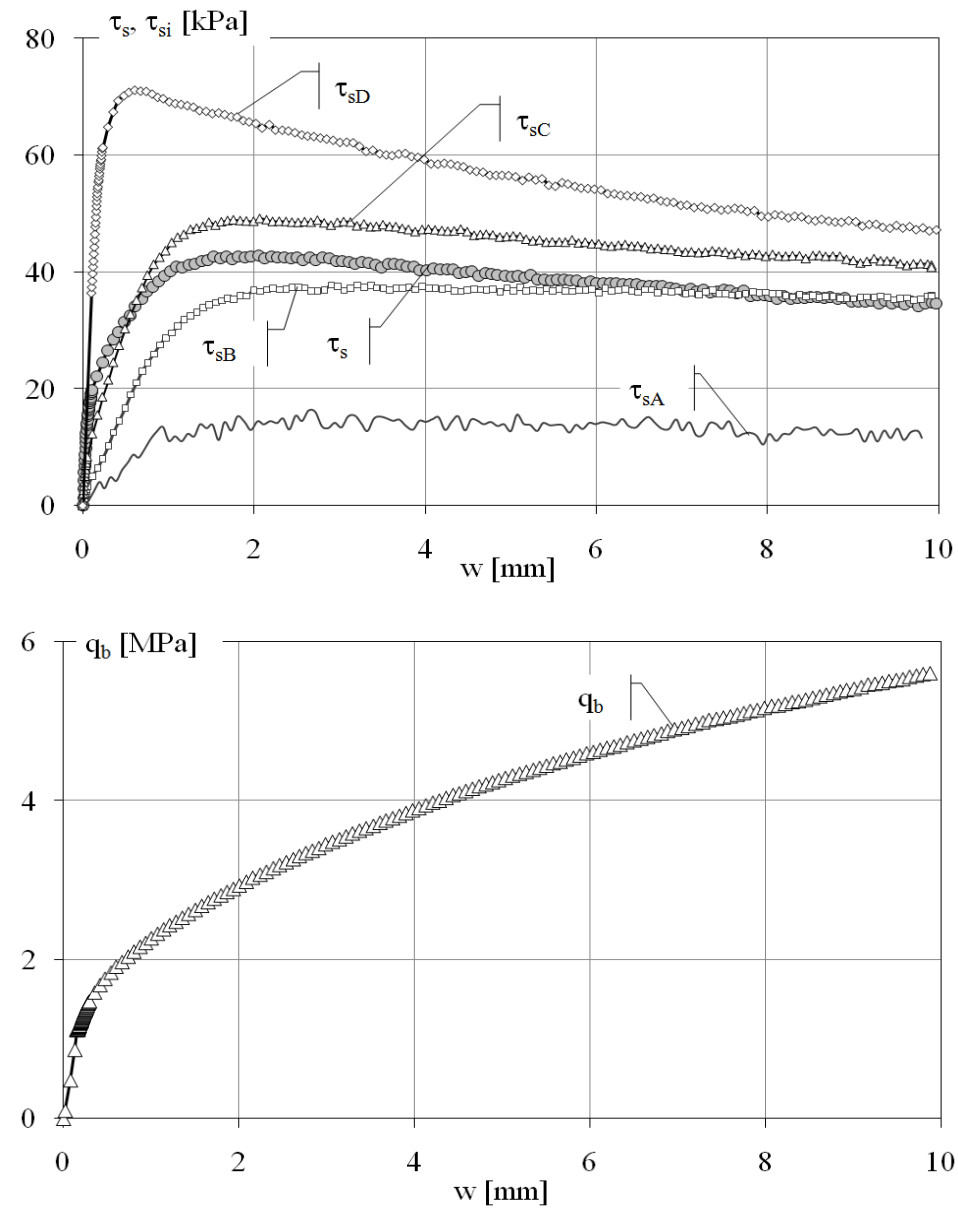
| PT3a_FF7                            |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |  | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|-------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|--|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato                  |                    | strum.         |                | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 0.8   | 11                   | 5                    | -3                 |
| a/g                                 | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |  | 2.7   | 35                   | 16                   | -8                 |
| [-]                                 | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            | C |  | 4.6   | 64                   | 29                   | -14                |
| 30                                  | 32                 | 10             | 245            | 44              | 0.093           | 1.07           | D |  | 6.7   | 92                   | 42                   | 15                 |
| $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                    |                |                |                 |                 |                |   |  |       |                      |                      |                    |






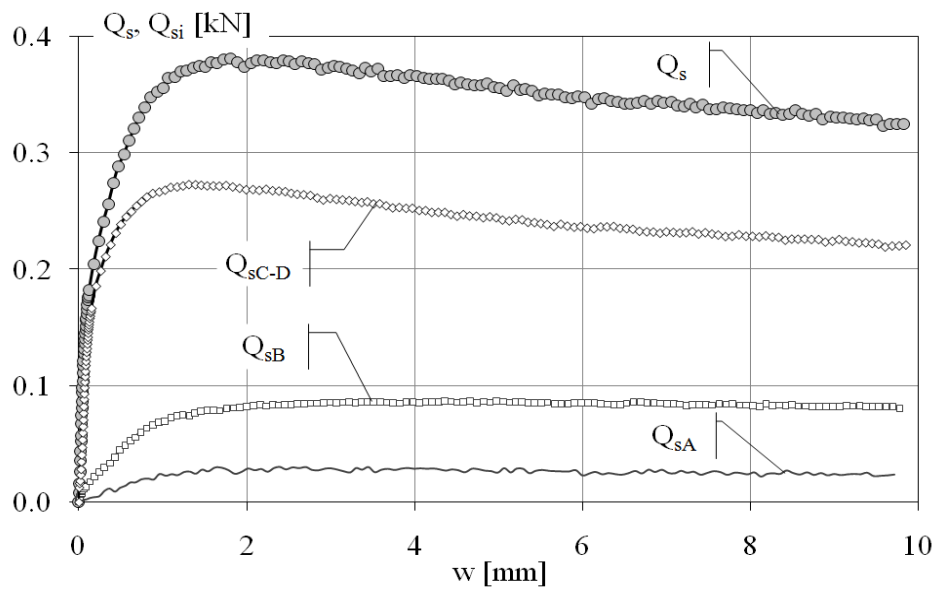
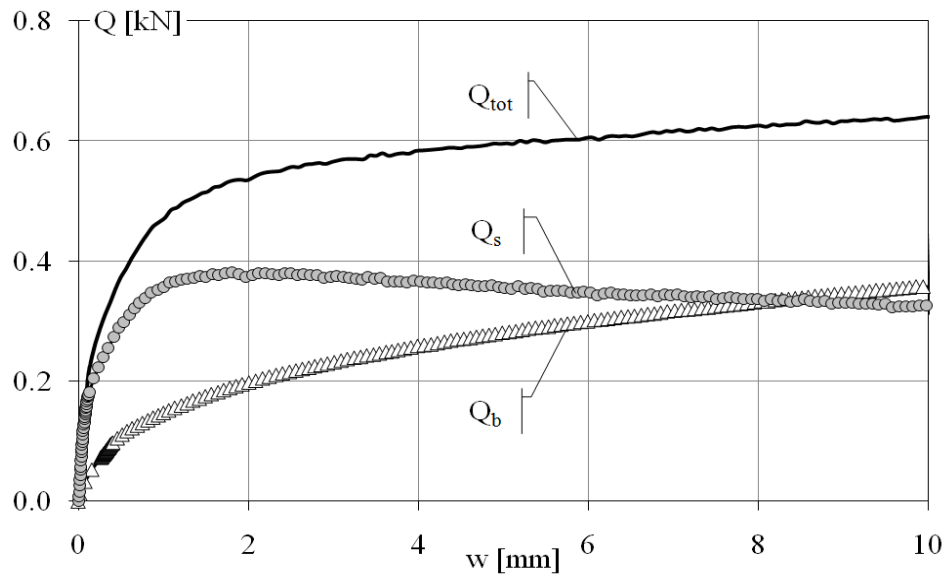
| PT3a_FF8                            |             |        |       | Compressione    |          |       |   |  | $z$ [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|-------------------------------------|-------------|--------|-------|-----------------|----------|-------|---|--|---------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato                  |             | strum. |       | Sabbia FF secca |          |       | A |  | 2.1     | 26                   | 12                   | -4                 |
| $a/g$                               | $a/g_{L/2}$ | $d_m$  | $L_m$ | $D_R$           | $D_{50}$ | $R_n$ | B |  | 6.8     | 90                   | 41                   | -19                |
| [-]                                 | [-]         | [mm]   | [mm]  | [%]             | [mm]     | [-]   | C |  | 12.0    | 163                  | 74                   | -34                |
| 80                                  | 86          | 10     | 245   | 46              | 0.093    | 1.07  | D |  | 17.5    | 242                  | 110                  | 35                 |
| $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |             |        |       |                 |          |       |   |  |         |                      |                      |                    |






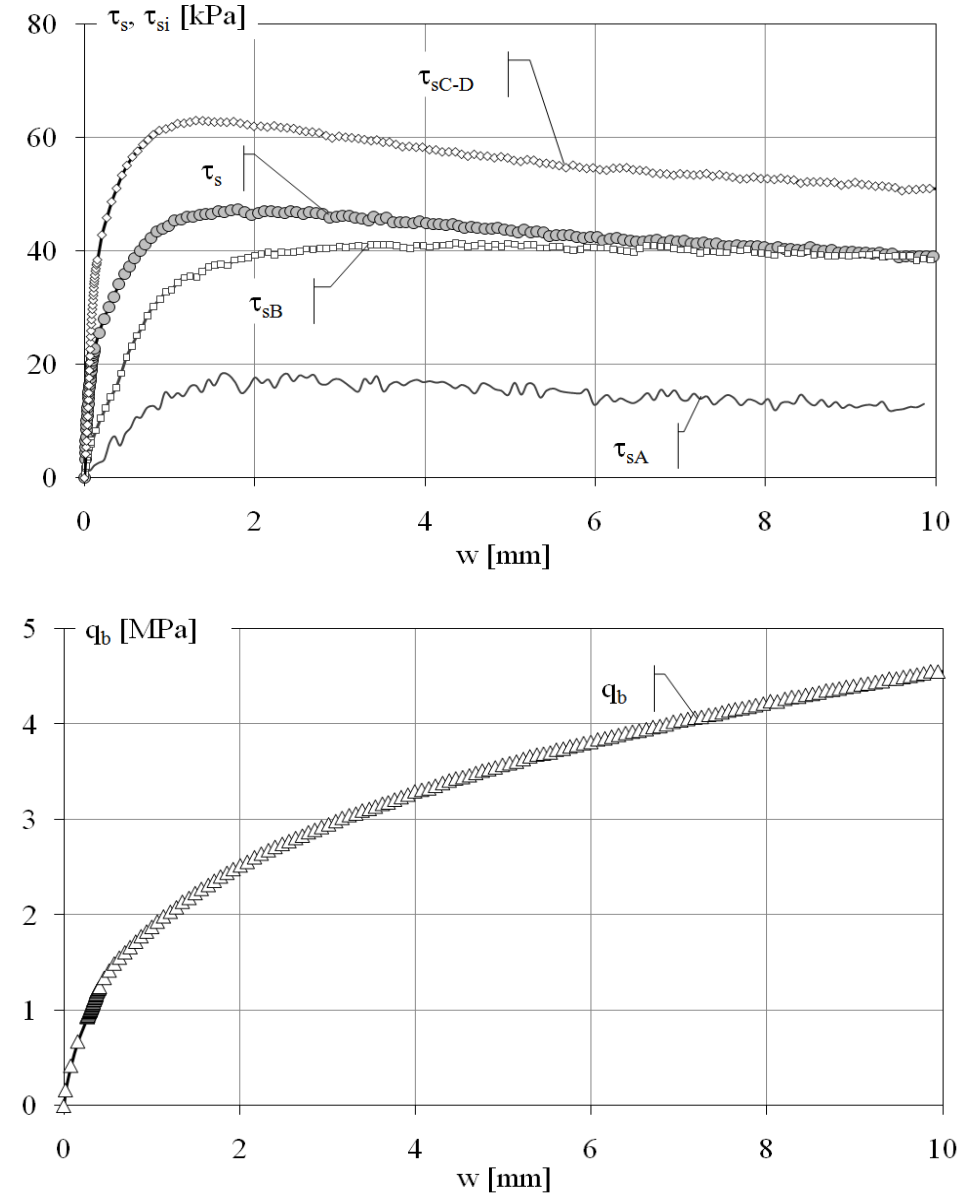
| PT3a_FF8           |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |  | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa]                | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|--|-------|-------------------------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    | strum.         |                | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 2.1   | 26                                  | 12                   | -4                 |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |  | 6.8   | 90                                  | 41                   | -19                |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            | C |  | 12.0  | 163                                 | 74                   | -34                |
| 80                 | 86                 | 10             | 245            | 46              | 0.093           | 1.07           | D |  | 17.5  | 242                                 | 110                  | 35                 |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   |  |       | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                      |                    |




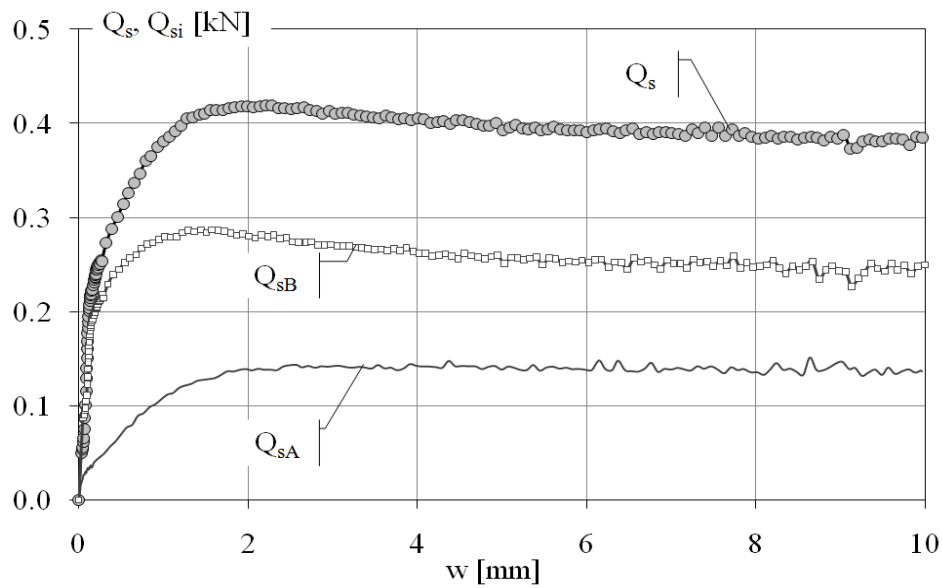
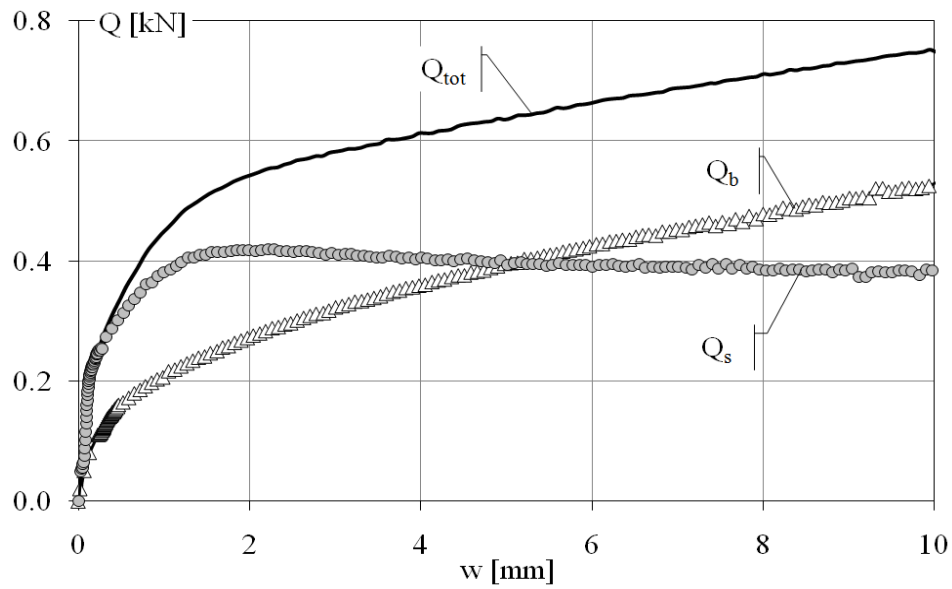
| PT3a_FF2           |                    |                |                | Compressione    |                 |                |                                     |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------------------------|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    | strum.         |                | Sabbia FF secca |                 |                | A                                   |  | 2.0   | 24                   | 11                   | -4                 |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B                                   |  | 6.6   | 86                   | 39                   | -16                |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            | C-D                                 |  | 14.5  | 198                  | 90                   | 3                  |
| 80                 | 86                 | 10             | 245            | 42              | 0.093           | 1.07           | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |   |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |                                     |   |       |                      |                      |                    |




| PT3a_FF2           |                    |                |                | Compressione    |                 |                |                                     |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------------------------|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    | strum.         |                | Sabbia FF secca |                 |                | A                                   |  | 2.0   | 24                   | 11                   | -4                 |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B                                   |  | 6.6   | 86                   | 39                   | -16                |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            | C-D                                 |  | 14.5  | 198                  | 90                   | 3                  |
| 80                 | 86                 | 10             | 245            | 42              | 0.093           | 1.07           | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |   |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |                                     |   |       |                      |                      |                    |

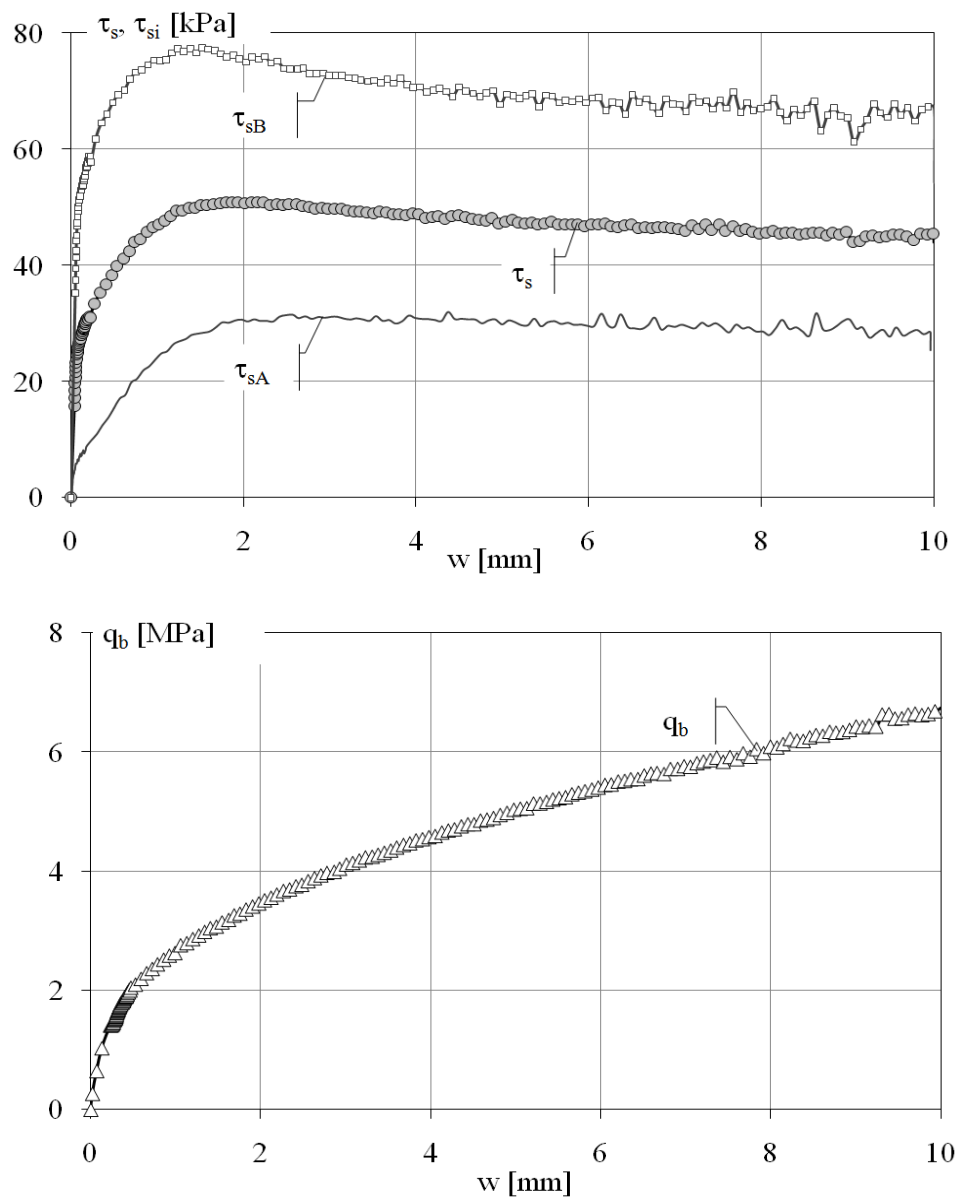






| PT1_FF28           |                    |                |                 | Compressione   |                 |                |  | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    | strum.         | Sabbia FF secca |                |                 |                |   |       |                      |                      |                    |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub>  | D <sub>R</sub> | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | A   | 5.6   | 73                   | 34                   | -8                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]            | [%]            | [mm]            | [-]            | B   | 15.8  | 207                  | 100                  | 23                 |
| 80                 | 86                 | 10             | 245             | 51             | 0.093           | 1.07           | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$   |       |                      |                      |                    |

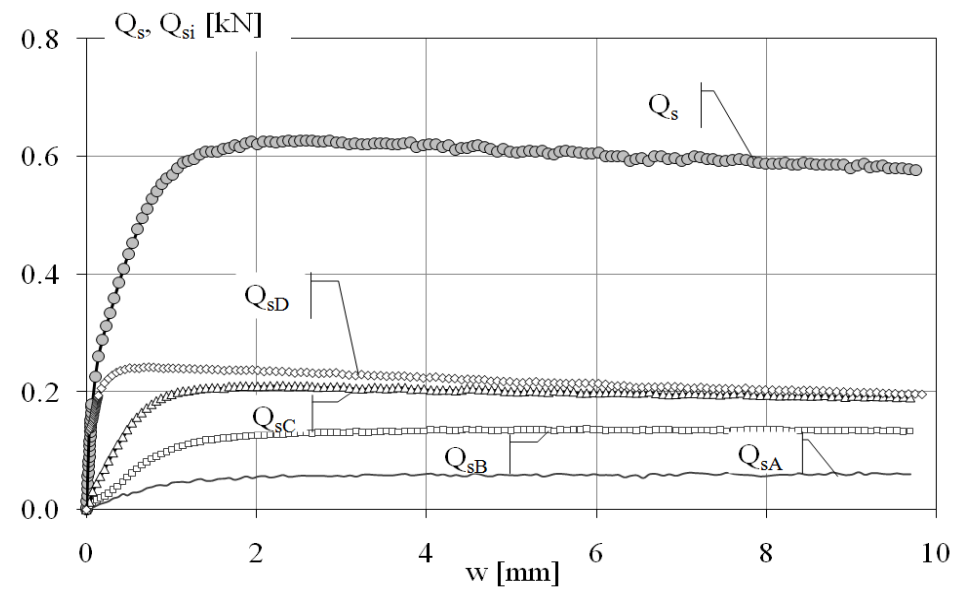
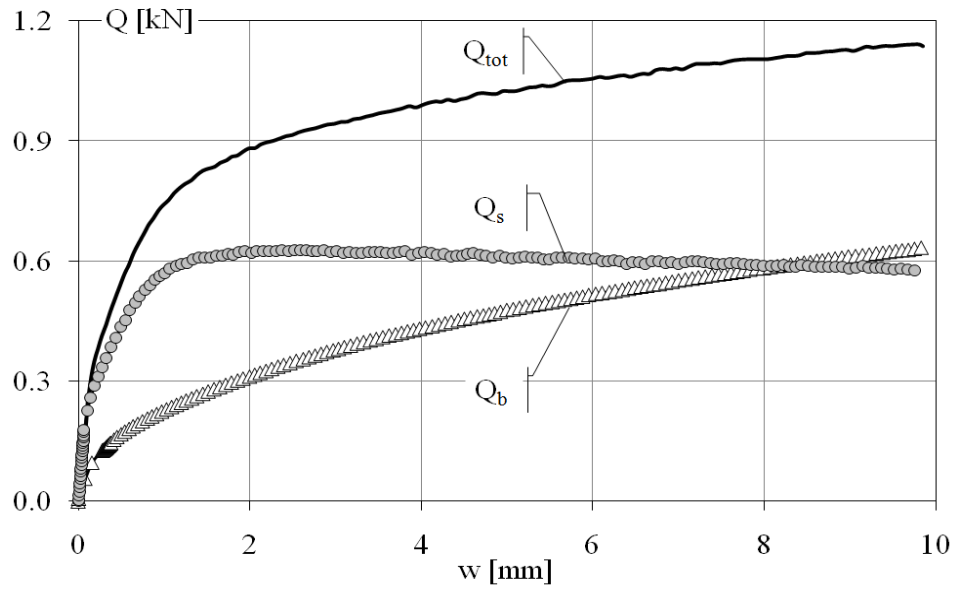




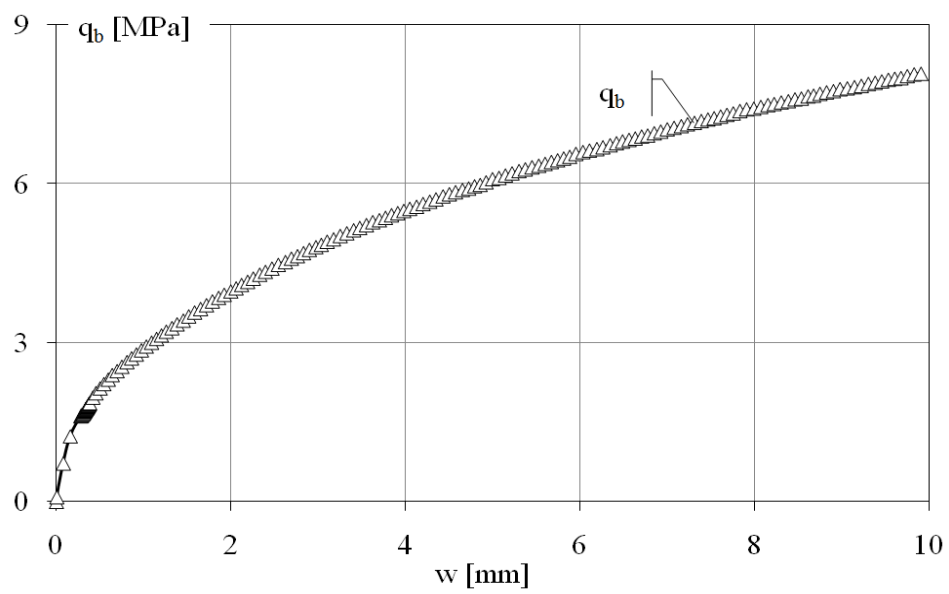
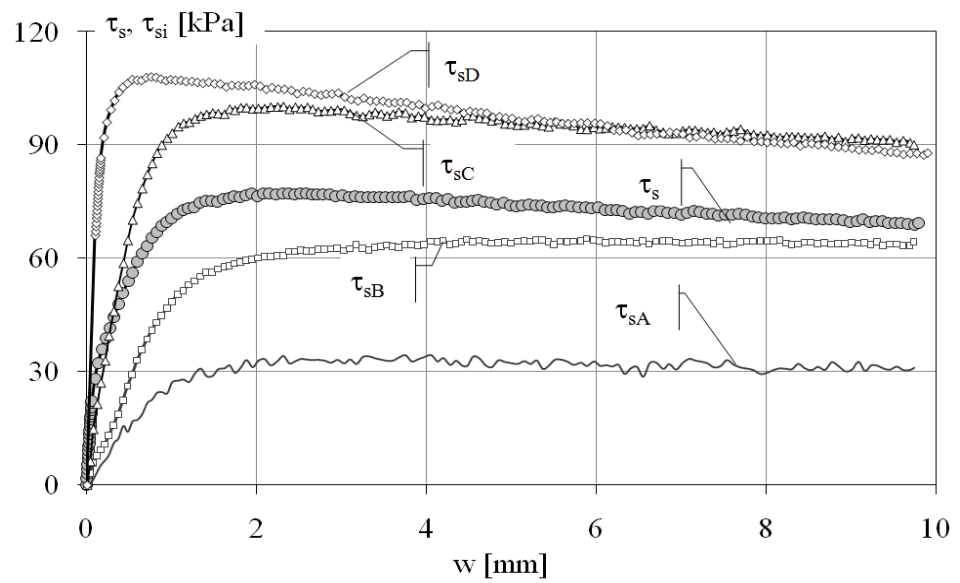
| PT1_FF28           |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |   | z [m]                               | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    | strum.         |                | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 5.6                                 | 73                   | 34                   | -8                 |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   | 15.8                                | 207                  | 100                  | 23                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                      |                      |                    |
| 80                 | 86                 | 10             | 245            | 51              | 0.093           | 1.07           | B |   |                                     |                      |                      |                    |



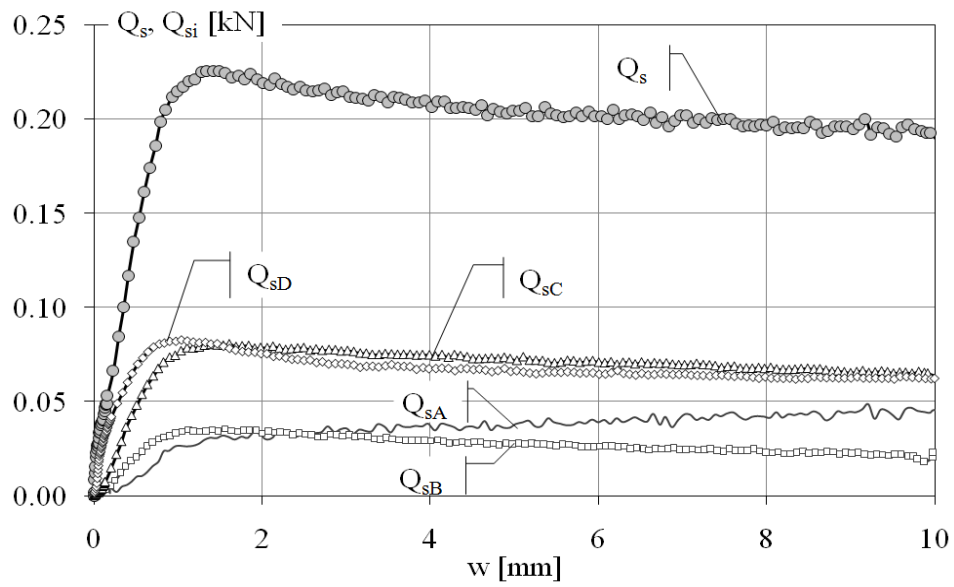
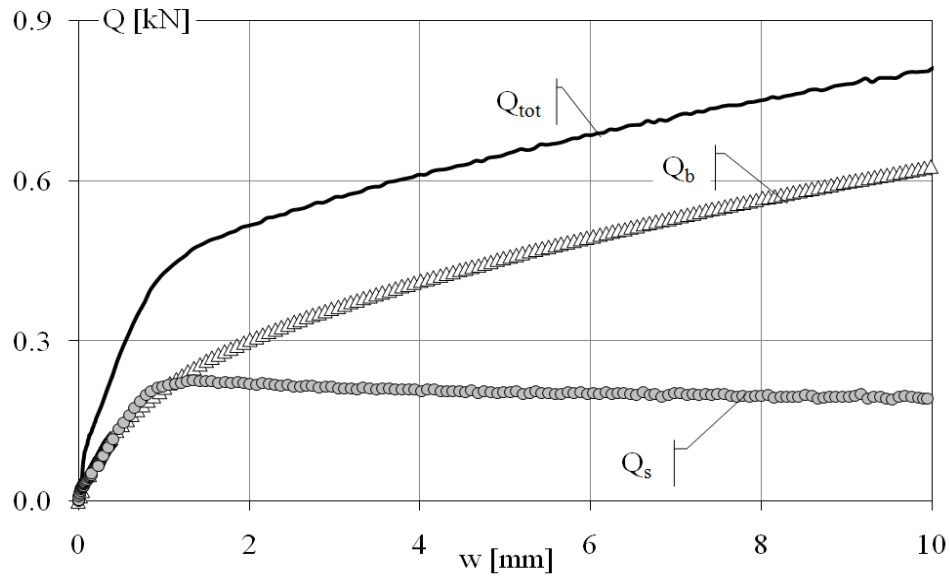
| PT3a_FF6                            |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|-------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato                  |                    | strum.         |                | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 3.3   | 42                   | 19                   | -5                 |
| a/g                                 | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |  | 10.8  | 143                  | 65                   | -28                |
| [-]                                 | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            | C |  | 19.4  | 262                  | 119                  | -56                |
| 130                                 | 140                | 10             | 245            | 46              | 0.093           | 1.07           | D |  | 28.1  | 391                  | 178                  | 60                 |
| $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                    |                |                |                 |                 |                |   |   |       |                      |                      |                    |







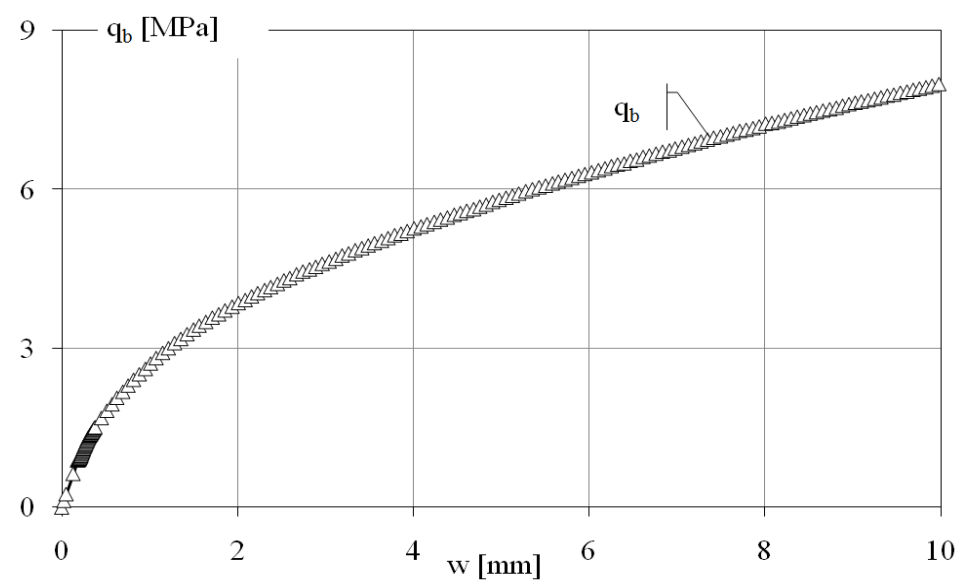
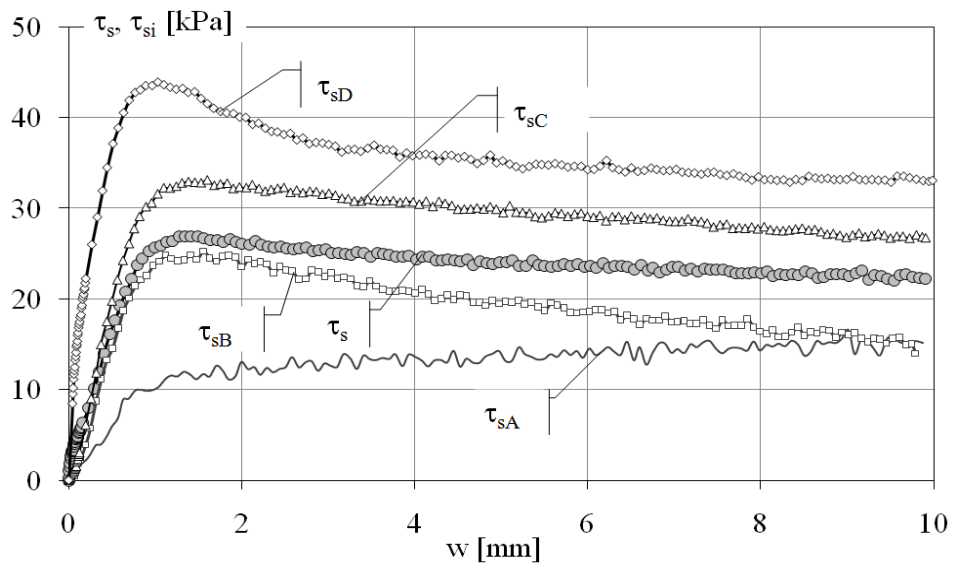
| PT3a_FF6                            |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |  | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|-------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|--|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato                  |                    | strum.         |                | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 3.3   | 42                   | 19                   | -5                 |
| a/g                                 | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |  | 10.8  | 143                  | 65                   | -28                |
| [-]                                 | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            | C |  | 19.4  | 262                  | 119                  | -56                |
| 130                                 | 140                | 10             | 245            | 46              | 0.093           | 1.07           | D |  | 28.1  | 391                  | 178                  | 60                 |
| $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                    |                |                |                 |                 |                |   |  |       |                      |                      |                    |



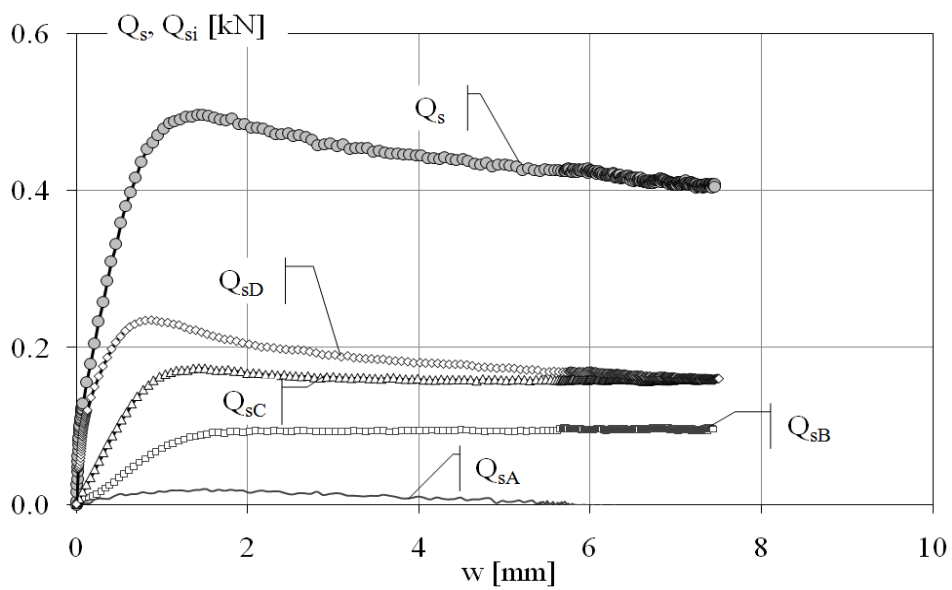
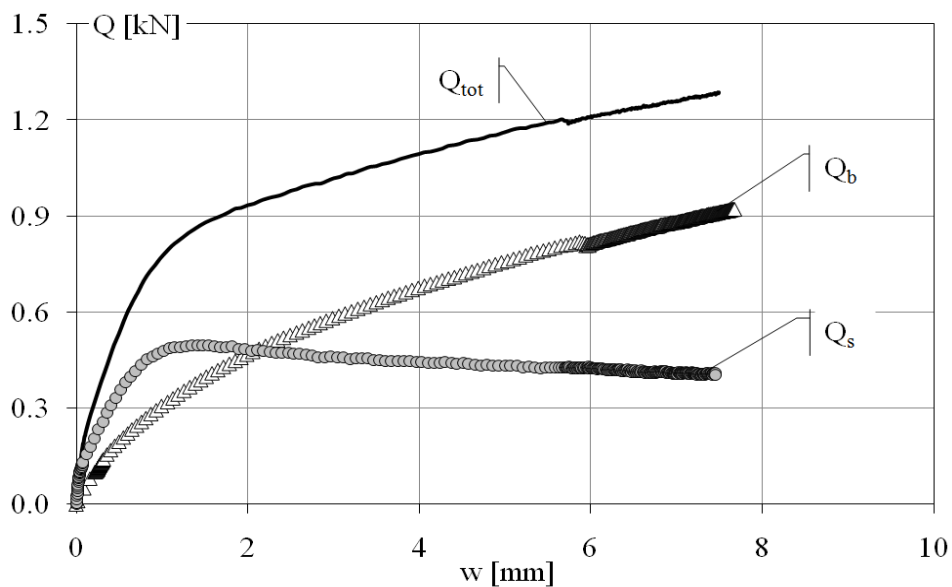
| PT3a_FF9                            |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |  | $z$ [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|-------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|--|---------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato                  |                    | strum.         |                | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 1.2     | 18                   | 8                    | -1                 |
| a/g                                 | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |  | 3.1     | 46                   | 21                   | -12                |
| [-]                                 | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            | C |  | 5.0     | 75                   | 34                   | -14                |
| 30                                  | 33                 | 10             | 245            | 85              | 0.093           | 1.07           | D |  | 7.0     | 108                  | 49                   | 1                  |
| $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                    |                |                |                 |                 |                |   |  |         |                      |                      |                    |



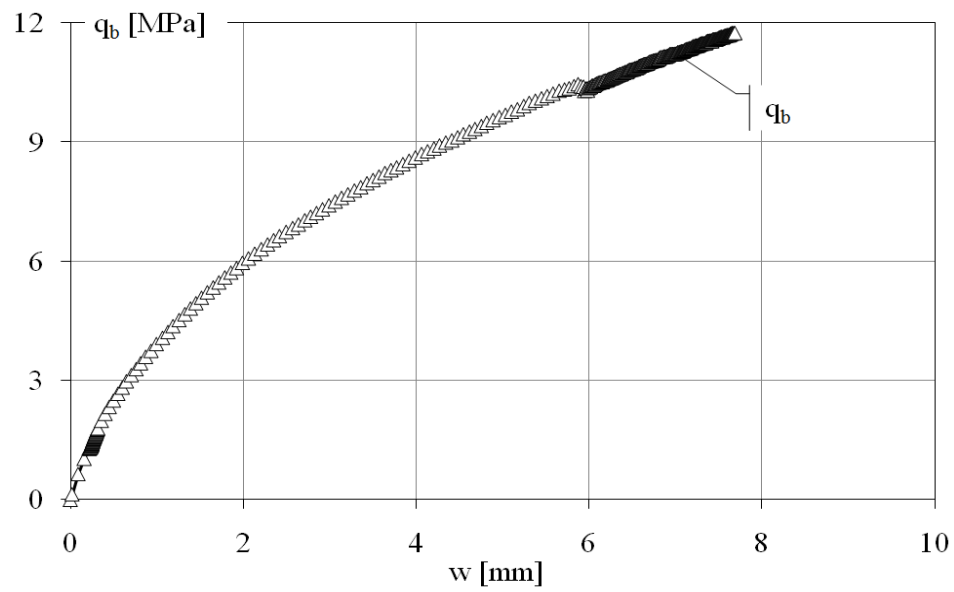
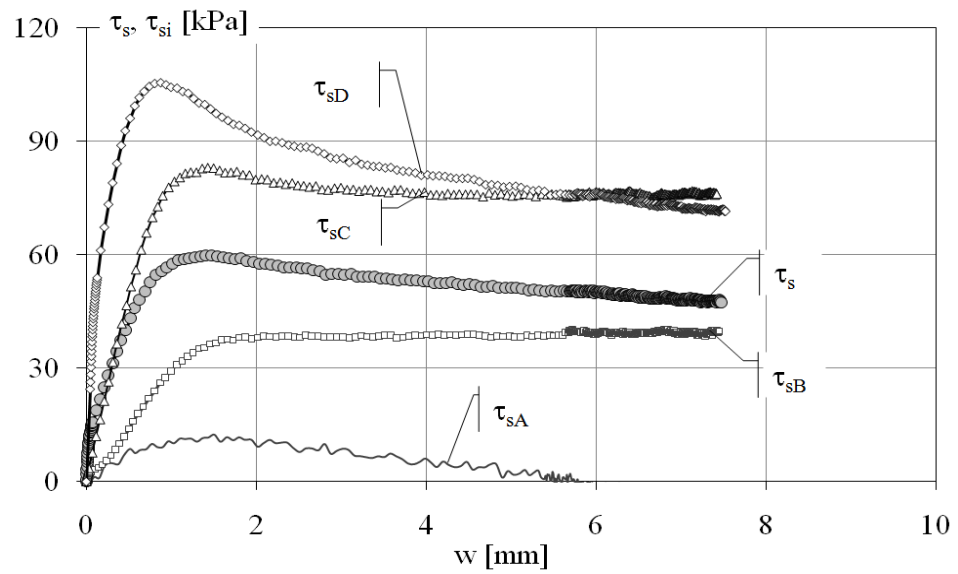
| PT3a_FF9           |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa]                | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------|-------------------------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    | strum.         |                | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 1.2   | 18                                  | 8                    | -1                 |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |  | 3.1   | 46                                  | 21                   | -12                |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            | C |  | 5.0   | 75                                  | 34                   | -14                |
| 30                 | 33                 | 10             | 245            | 85              | 0.093           | 1.07           | D |  | 7.0   | 108                                 | 49                   | 1                  |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   |   |       | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                      |                    |



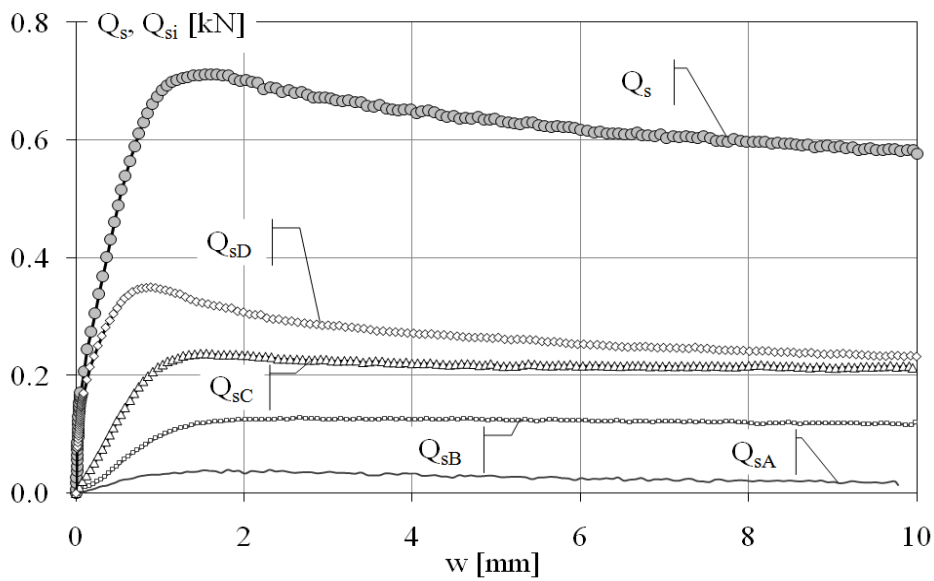
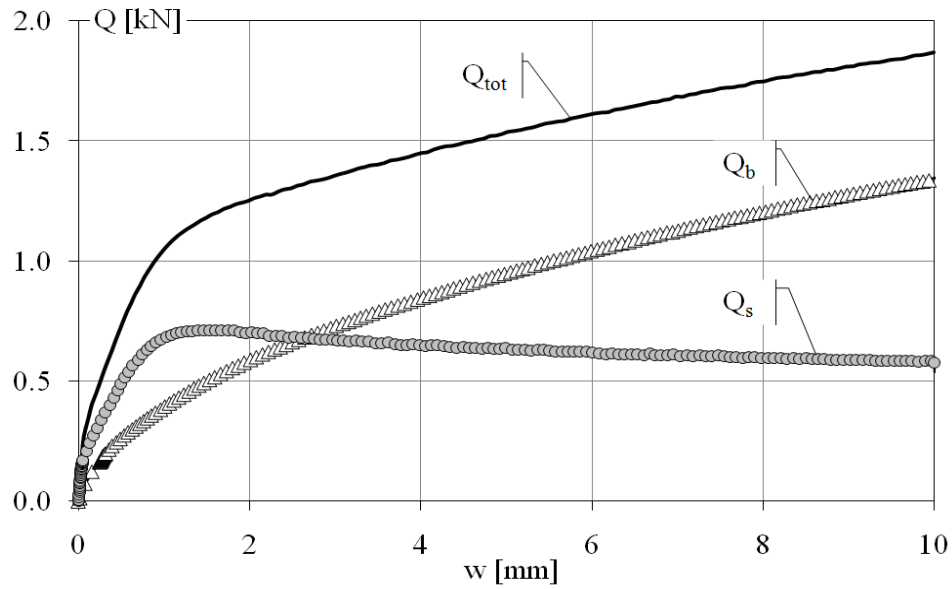
| PT3a_FF3                            |             |        |       | Compressione    |          |       |   |  | $z$ [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|-------------------------------------|-------------|--------|-------|-----------------|----------|-------|---|--|---------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato                  |             | strum. |       | Sabbia FF secca |          |       | A |  | 1.9     | 26                   | 12                   | -1                 |
| $a/g$                               | $a/g_{L/2}$ | $d_m$  | $L_m$ | $D_R$           | $D_{50}$ | $R_n$ | B |  | 6.8     | 99                   | 45                   | -11                |
| [-]                                 | [-]         | [mm]   | [mm]  | [%]             | [mm]     | [-]   | C |  | 12.5    | 187                  | 85                   | -34                |
| 80                                  | 86          | 10     | 245   | 82              | 0.093    | 1.07  | D |  | 18      | 275                  | 125                  | 21                 |
| $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |             |        |       |                 |          |       |   |  |         |                      |                      |                    |







| PT3a_FF3           |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |  | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa]                | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|--|-------|-------------------------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    | strum.         |                | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 1.9   | 26                                  | 12                   | -1                 |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |  | 6.8   | 99                                  | 45                   | -11                |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            | C |  | 12.5  | 187                                 | 85                   | -34                |
| 80                 | 86                 | 10             | 245            | 82              | 0.093           | 1.07           | D |  | 18    | 275                                 | 125                  | 21                 |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   |  |       | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                      |                    |

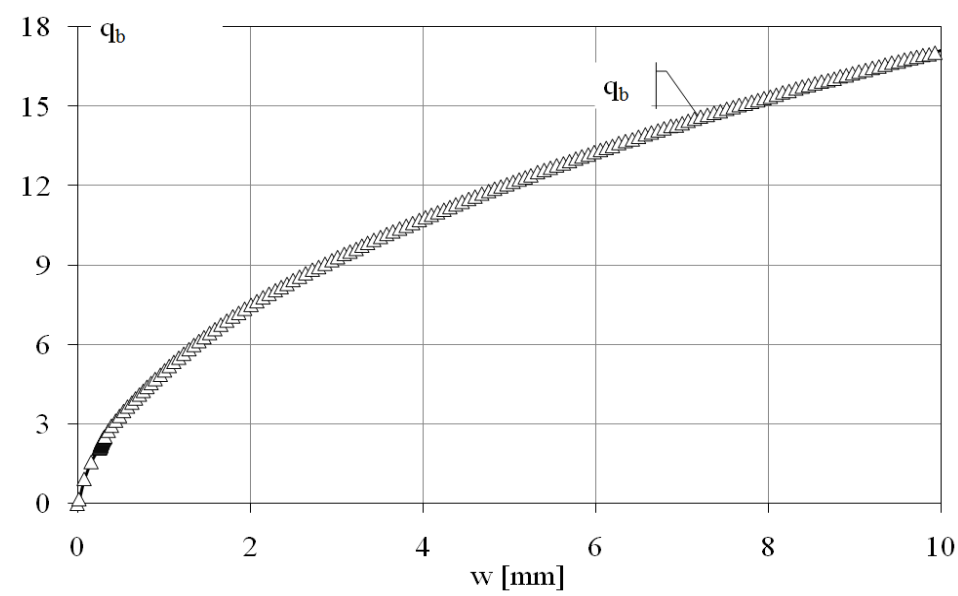
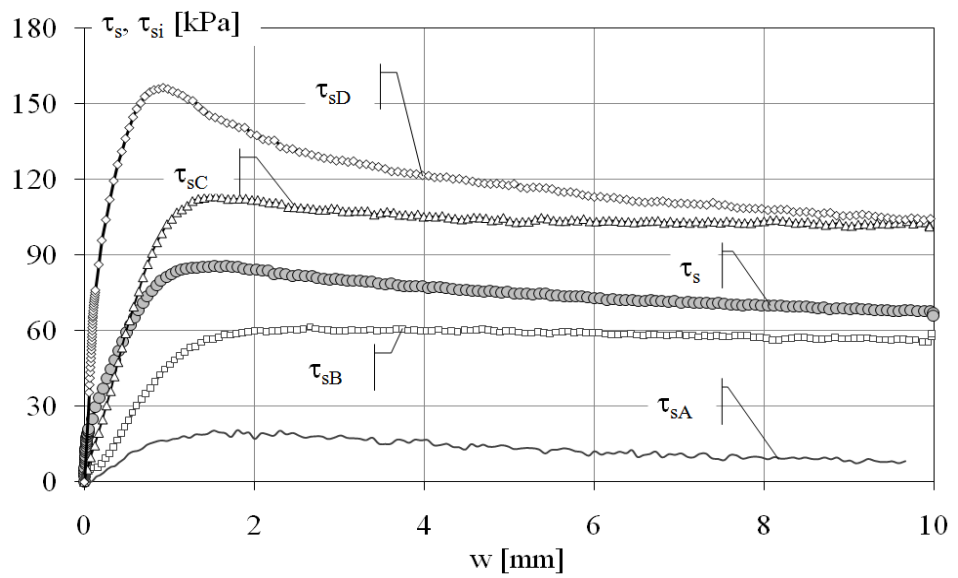




| PT3a_FF5           |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |  | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa]                | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|--|-------|-------------------------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    | strum.         |                | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 3.7   | 53                                  | 24                   | -1                 |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |  | 11.6  | 169                                 | 77                   | -22                |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            | C |  | 20.0  | 299                                 | 136                  | -57                |
| 130                | 137                | 10             | 245            | 84              | 0.093           | 1.07           | D |  | 28.6  | 437                                 | 199                  | 34                 |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   |  |       | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                      |                    |

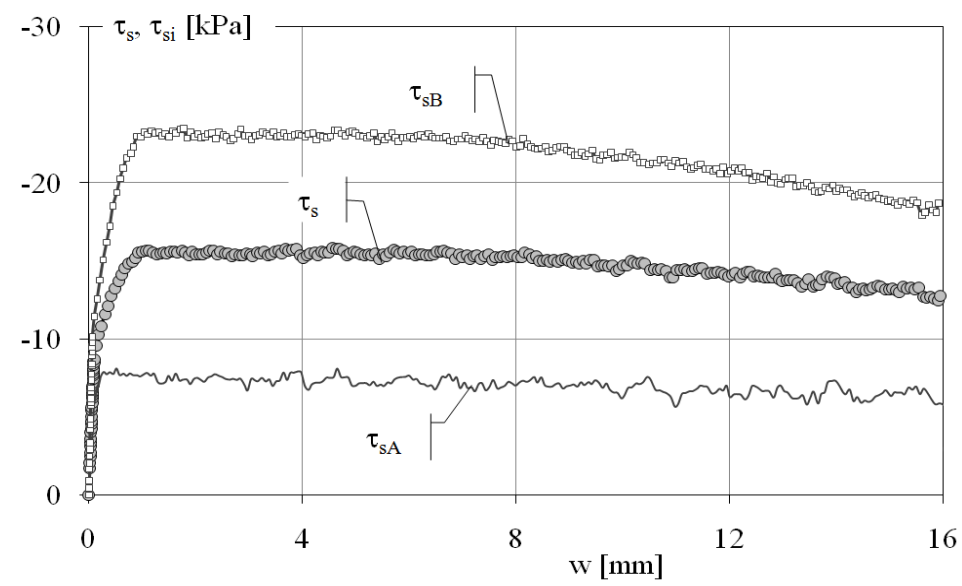
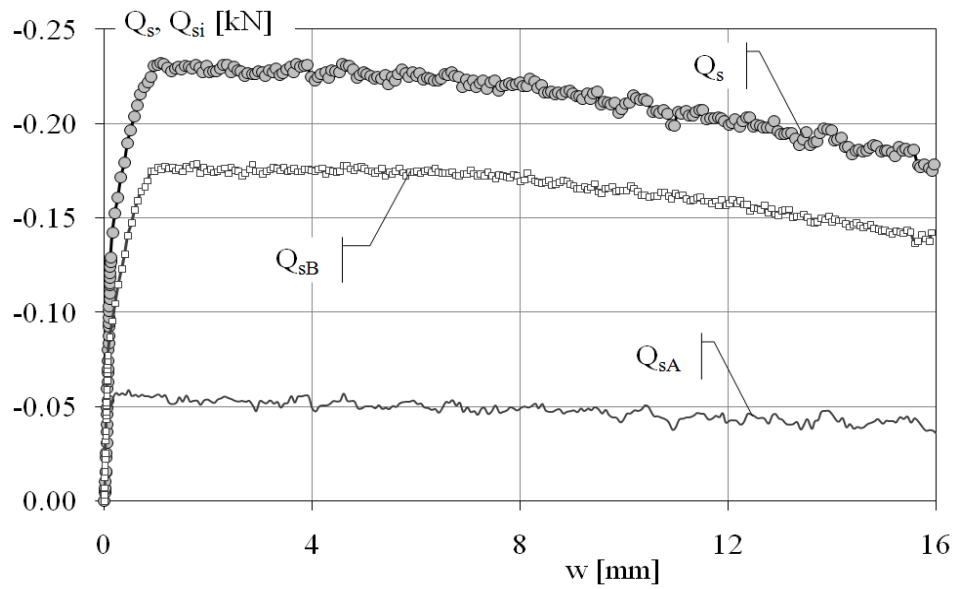




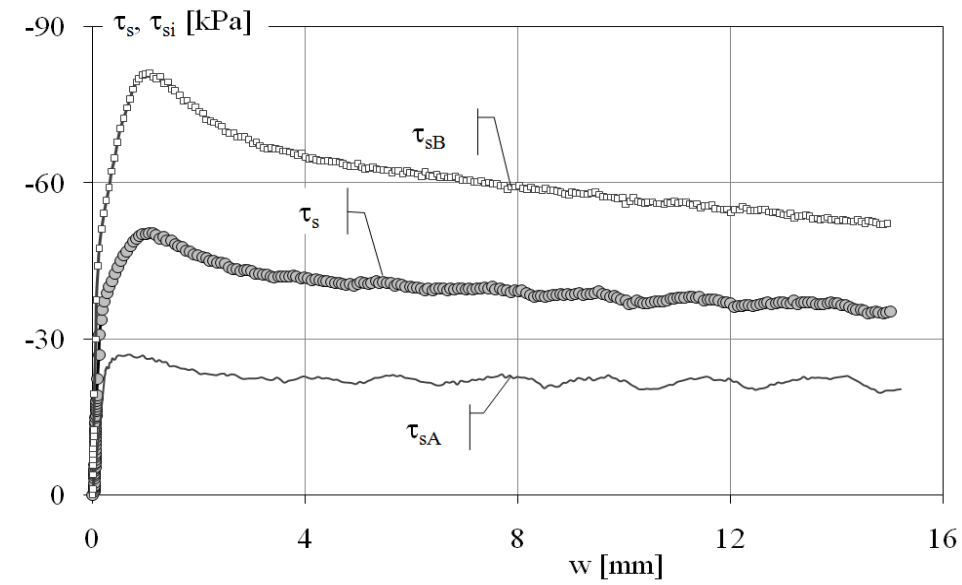
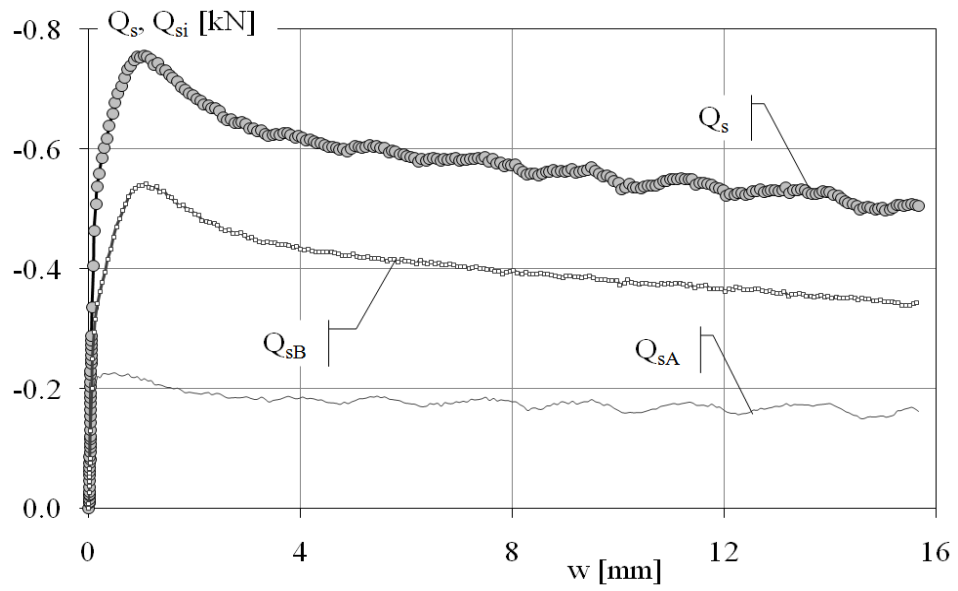
| PT3a_FF5           |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa]                | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------|-------------------------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    | strum.         |                | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 3.7   | 53                                  | 24                   | -1                 |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |  | 11.6  | 169                                 | 77                   | -22                |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            | C |  | 20.0  | 299                                 | 136                  | -57                |
| 130                | 137                | 10             | 245            | 84              | 0.093           | 1.07           | D |  | 28.6  | 437                                 | 199                  | 34                 |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   |   |       | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                      |                    |



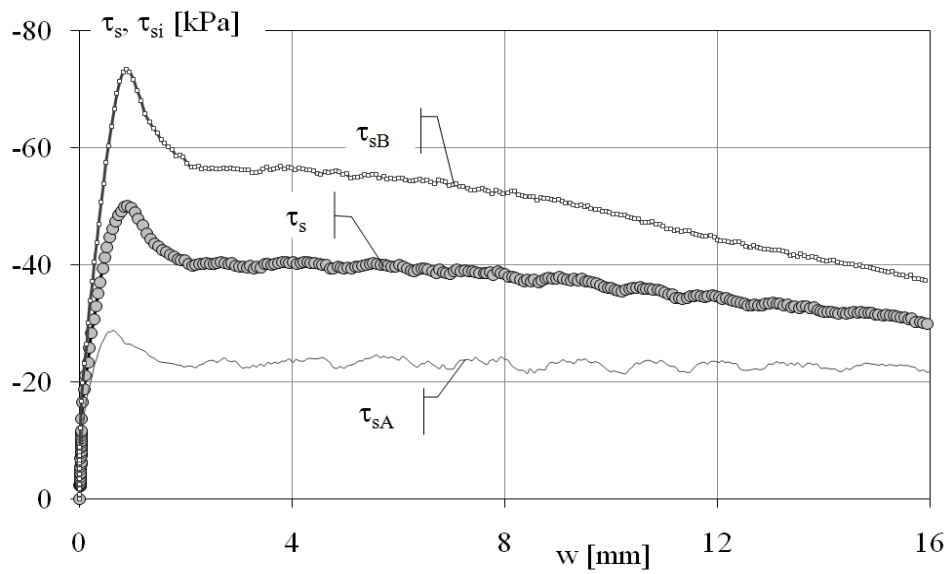
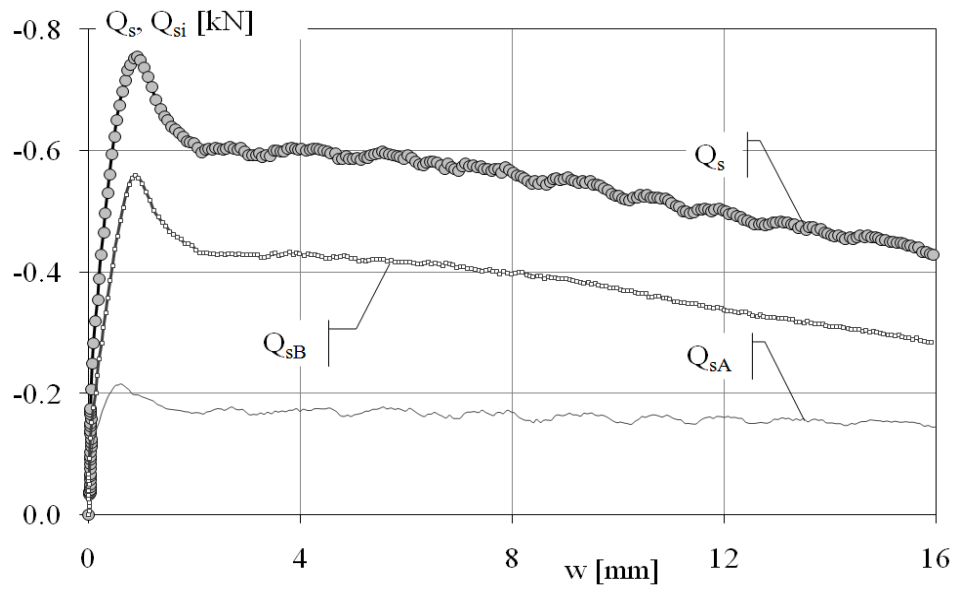
| SPT_16_MD_30       |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$<br>[kPa] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{res}$<br>[kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A   |  | 2.3   | 31                      | 14                      | -7                    |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   | 6.9   | 99                      | 45                      | 6                     |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            | B   |  |       |                         |                         |                       |
| 30                 | 33                 | 16             | 320            | 55              | 0.093           | 1.3            |   |   |       |                         |                         |                       |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                | k <sub>0</sub> = 1-senφ' <sub>cv</sub> =0.455 |   |       |                         |                         |                       |



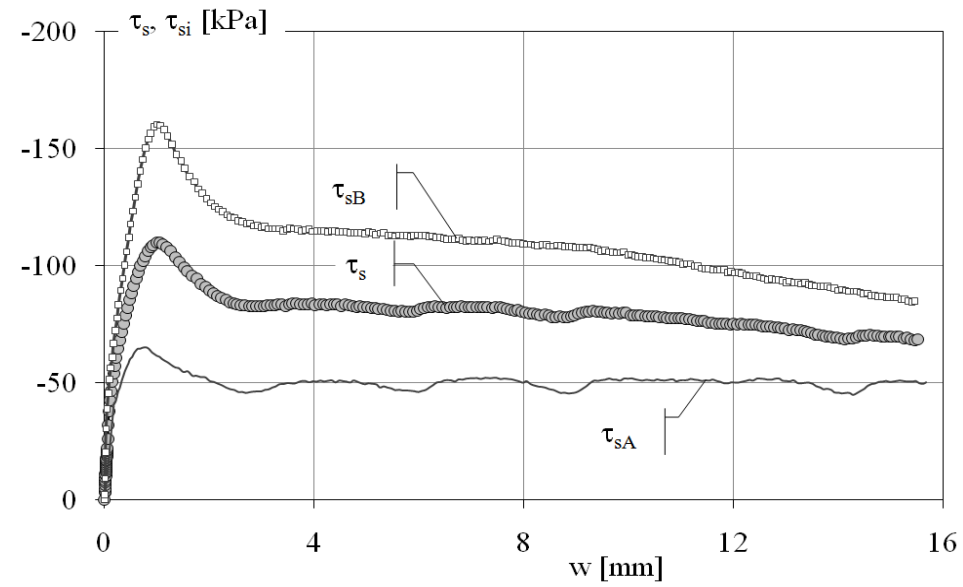
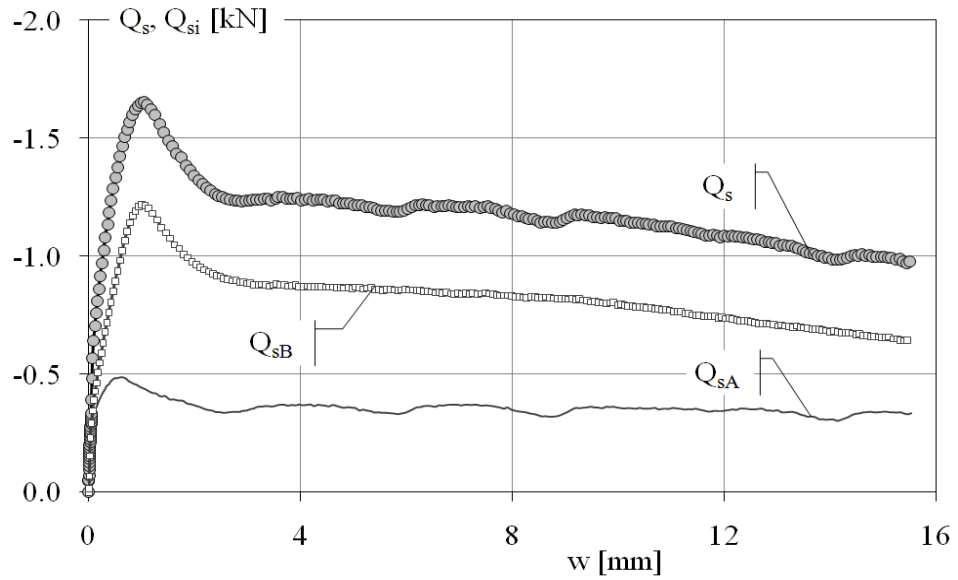
| SPT_16_MD_80                        |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|-------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato                  |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A | → | 7.1   | 97                   | 44                   | -25                |
| a/g                                 | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   |       |                      |                      |                    |
| [-]                                 | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   |       |                      |                      |                    |
| 80                                  | 90                 | 16             | 320            | 58              | 0.093           | 1.3            | B | → | 19.8  | 288                  | 131                  | 27                 |
| $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                    |                |                |                 |                 |                |   |   |       |                      |                      |                    |



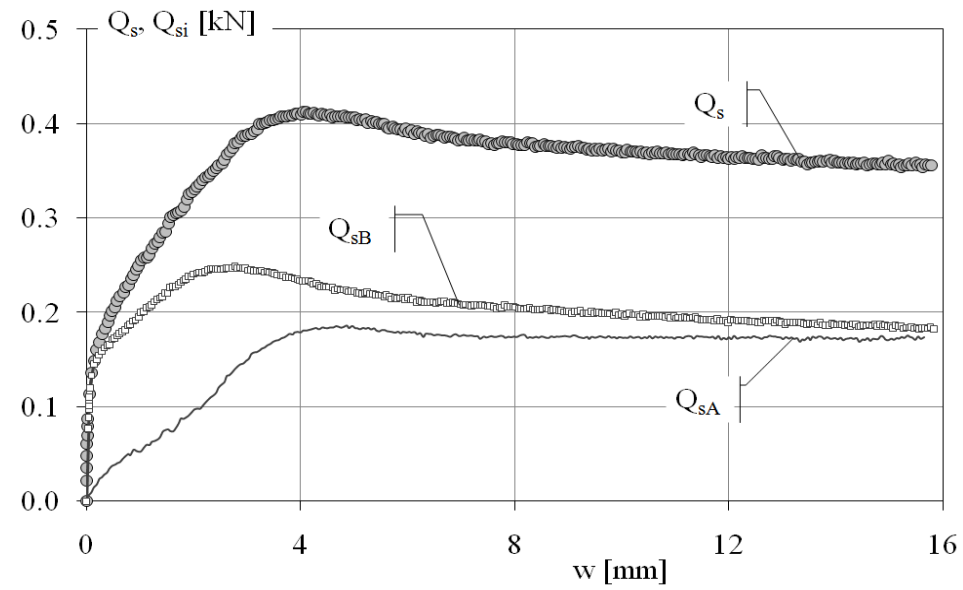
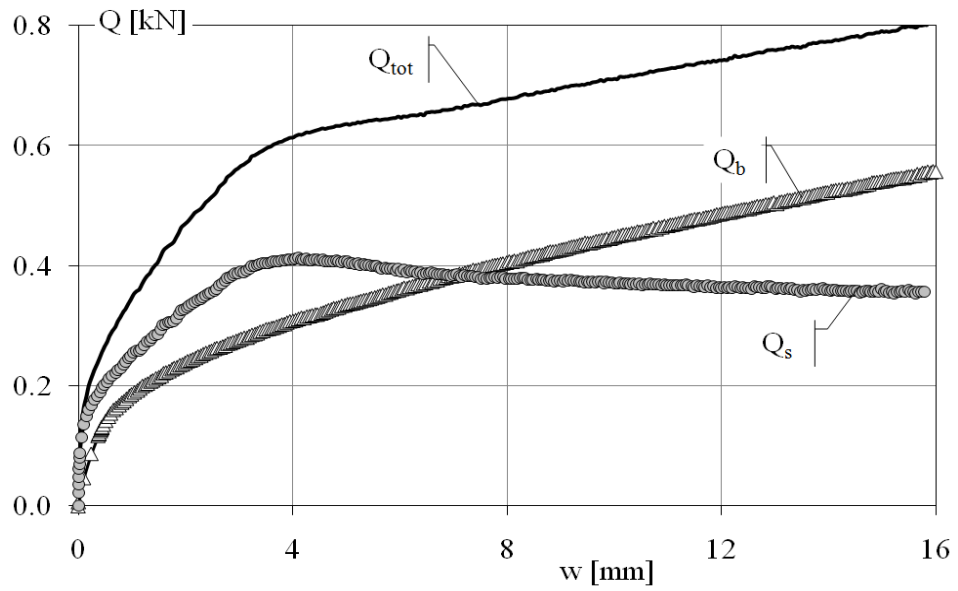
| SPT_16_HD_30                        |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|-------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato                  |                    | strum.         |                | Sabbia FF secca |                 |                | A | → | 2.3   | 33                   | 15                   | -14                |
| a/g                                 | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   | 7.0   | 108                  | 49                   | 9                  |
| [-]                                 | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            | B | → |       |                      |                      |                    |
| 30                                  | 33                 | 16             | 320            | 82              | 0.093           | 1.3            |   |   |       |                      |                      |                    |
| $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                    |                |                |                 |                 |                |   |   |       |                      |                      |                    |



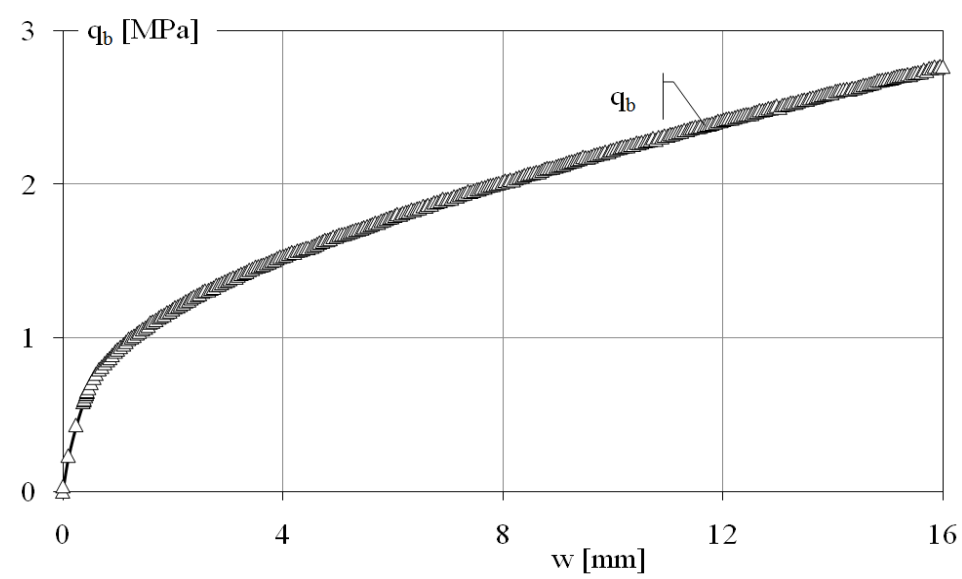
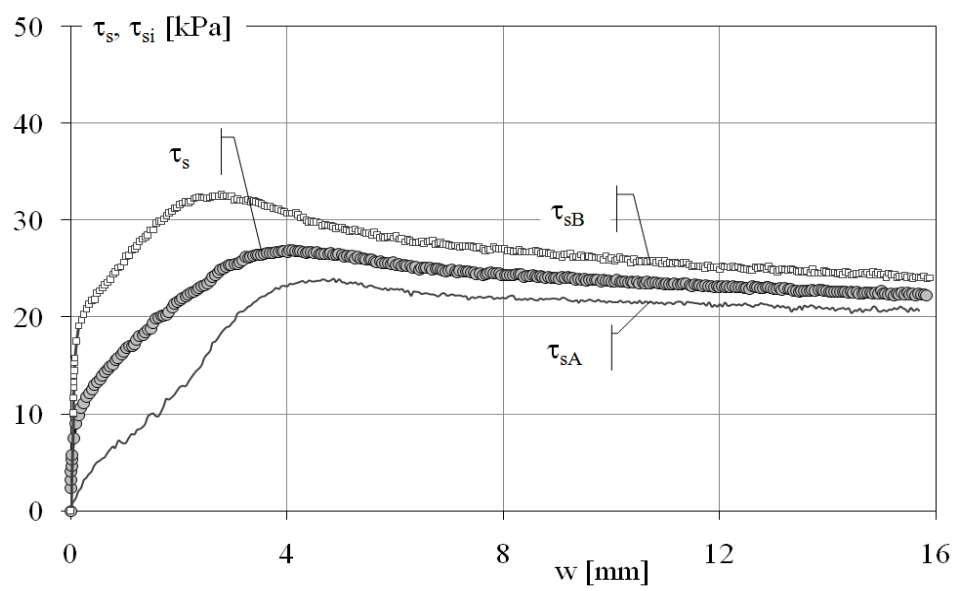
| SPT_16_HD_80                        |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|-------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato                  |                    | strum.         |                | Sabbia FF secca |                 |                | A | → | 6.4   | 92                   | 42                   | -40                |
| a/g                                 | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |   |       |                      |                      |                    |
| [-]                                 | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |   | 19.2  | 297                  | 135                  | 33                 |
| 80                                  | 90                 | 16             | 320            | 84              | 0.093           | 1.3            | B | → |       |                      |                      |                    |
| $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                    |                |                |                 |                 |                |   |   |       |                      |                      |                    |



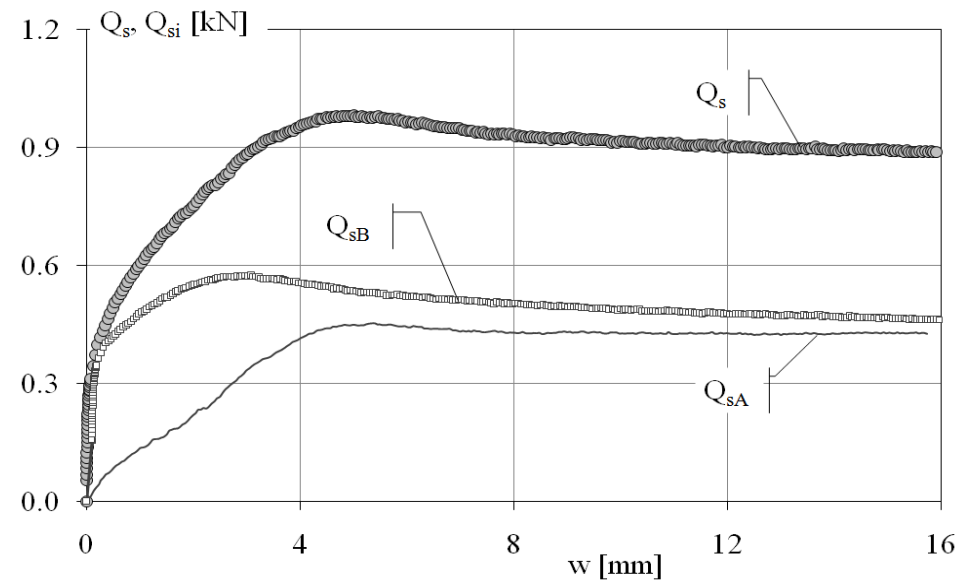
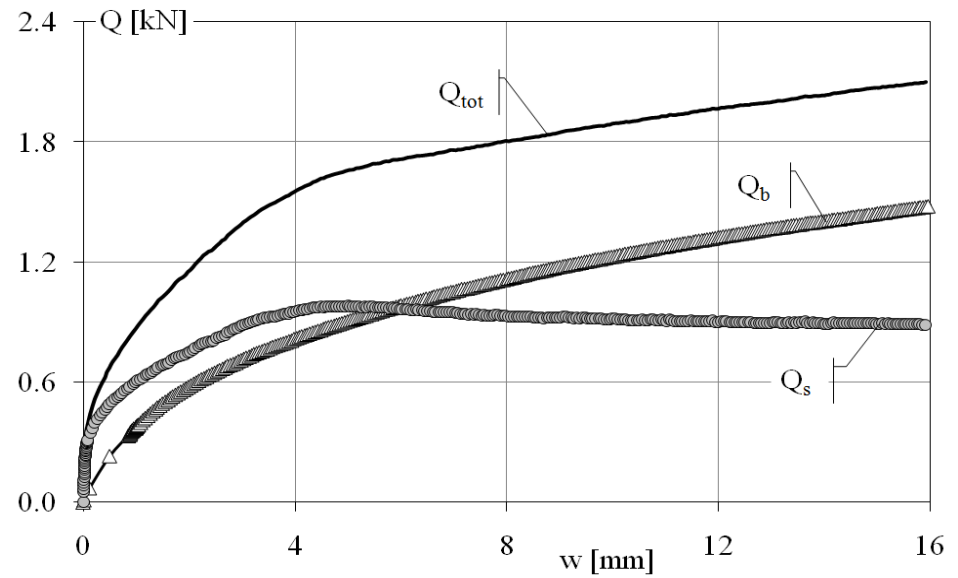
| SPC_16_MD_30       |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |                                     | z [m] | $\sigma'_{v0}$<br>[kPa] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{res}$<br>[kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|-------------------------------------|-------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |                                     | 2.4   | 33                      | 15                      | -10                   |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |                                     | 7.2   | 103                     | 47                      | 10                    |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |                                     |       |                         |                         |                       |
| 30                 | 34                 | 16             | 320            | 52              | 0.093           | 1.3            |   |                                     |       |                         |                         |                       |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |       |                         |                         |                       |



| SPC_16_MD_30                        |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |  | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|-------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|--|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato                  |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 2.4   | 33                   | 15                   | -10                |
| a/g                                 | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |  | 7.2   | 103                  | 47                   | 10                 |
| [-]                                 | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |  |       |                      |                      |                    |
| 30                                  | 34                 | 16             | 320            | 52              | 0.093           | 1.3            |   |  |       |                      |                      |                    |
| $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                    |                |                |                 |                 |                |   |  |       |                      |                      |                    |

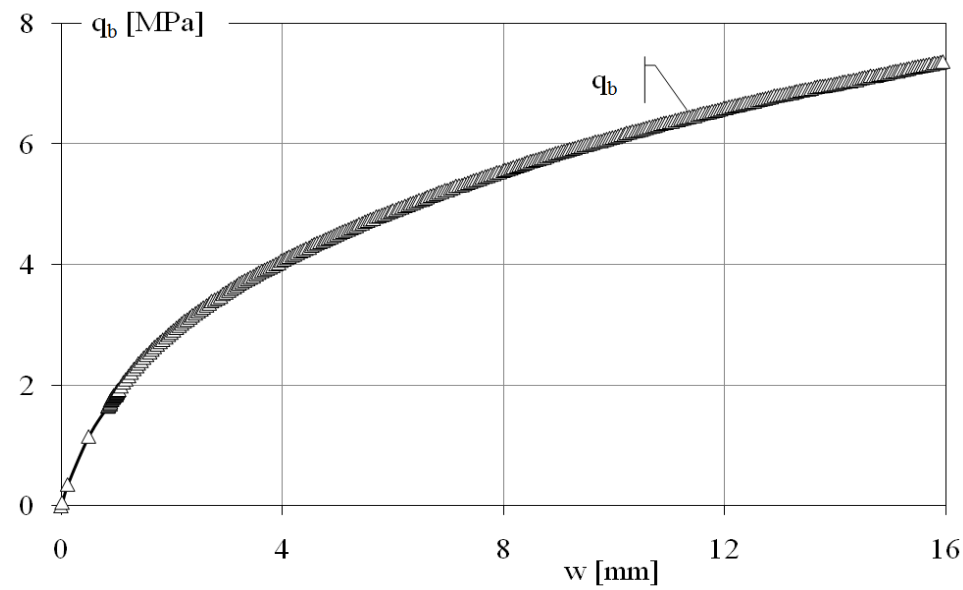
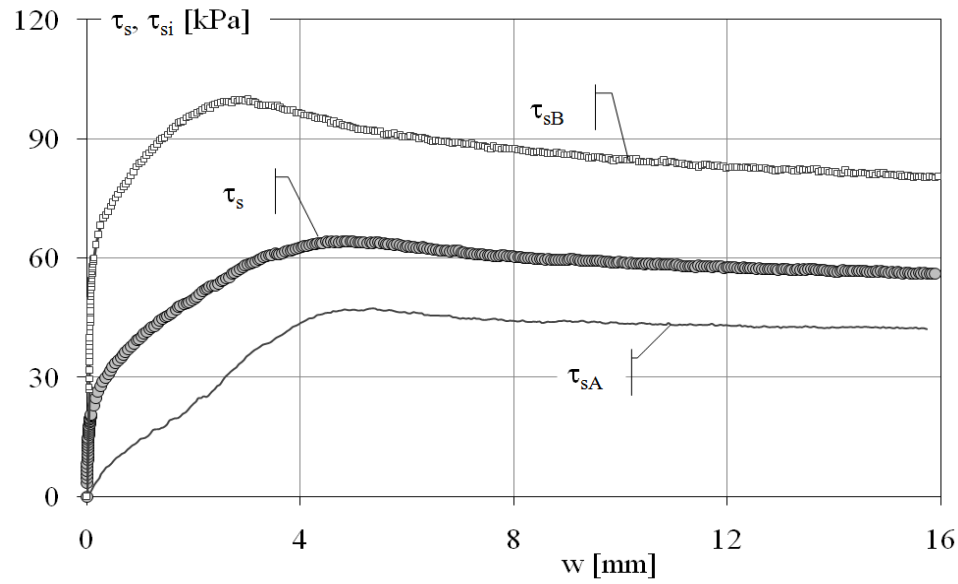


| SPC_16_MD_80       |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |                                     | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|-------------------------------------|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |                                     | 7.7   | 105                  | 48                   | -20                |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |                                     | 20.3  | 295                  | 134                  | 27                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |                                     |       |                      |                      |                    |
| 80                 | 89                 | 16             | 320            | 57              | 0.093           | 1.3            |   |                                     |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |       |                      |                      |                    |

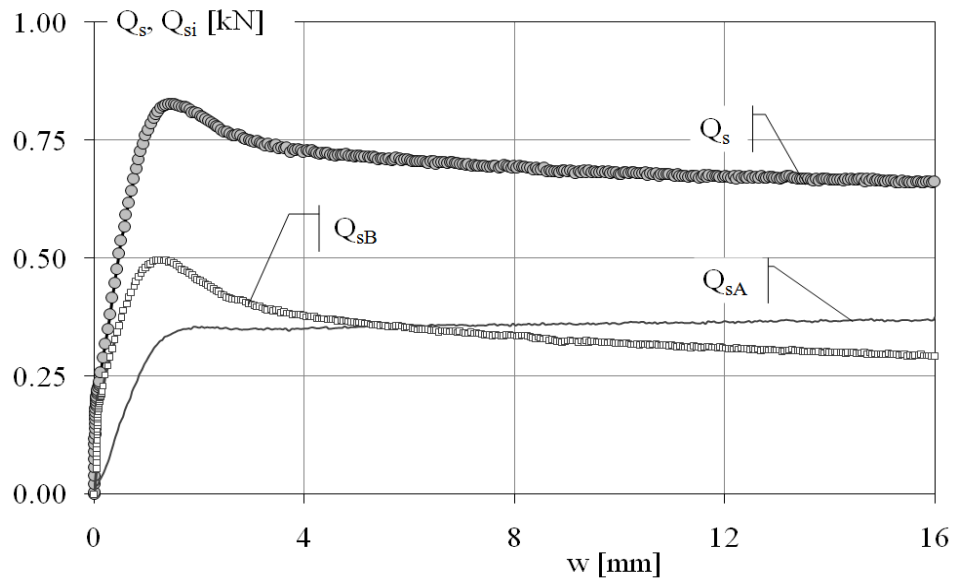
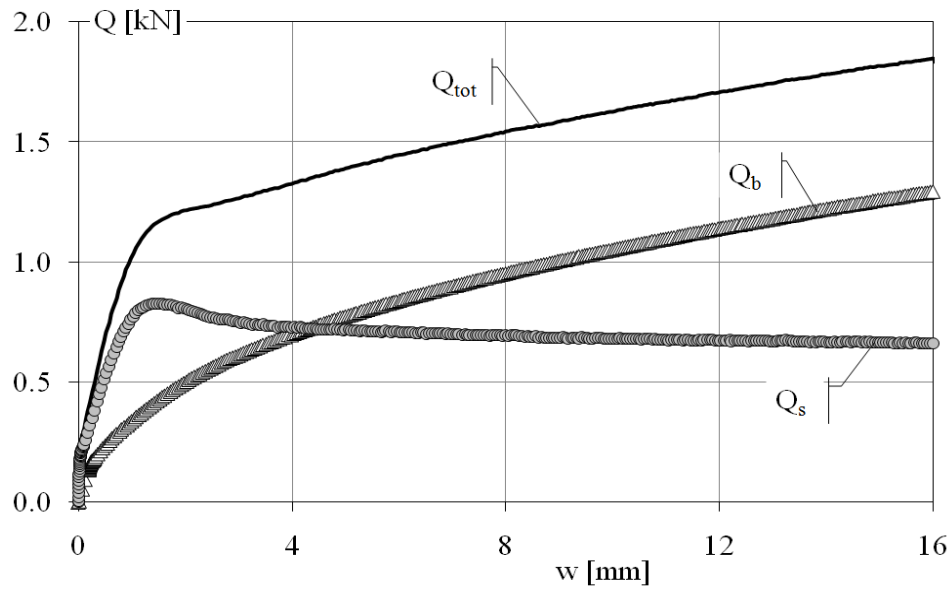




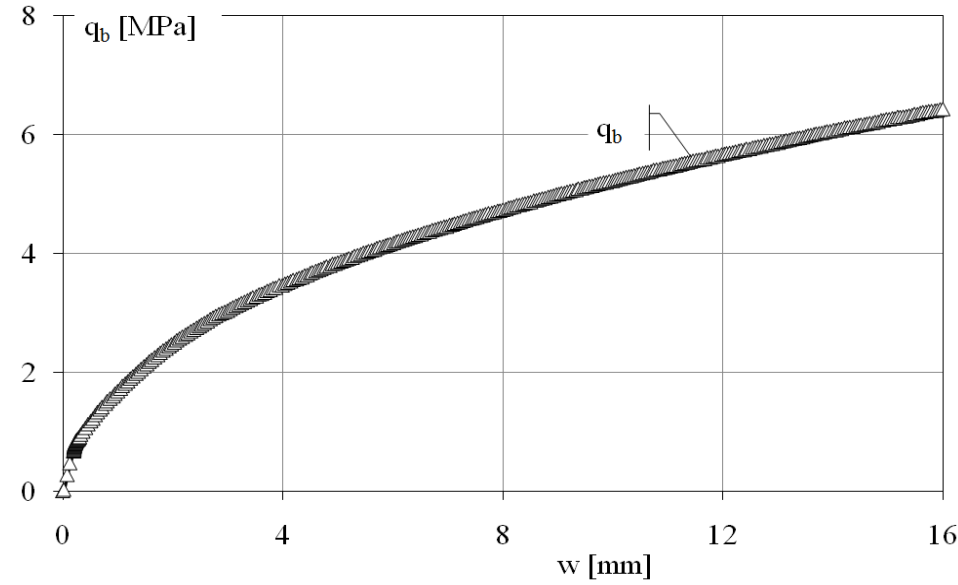
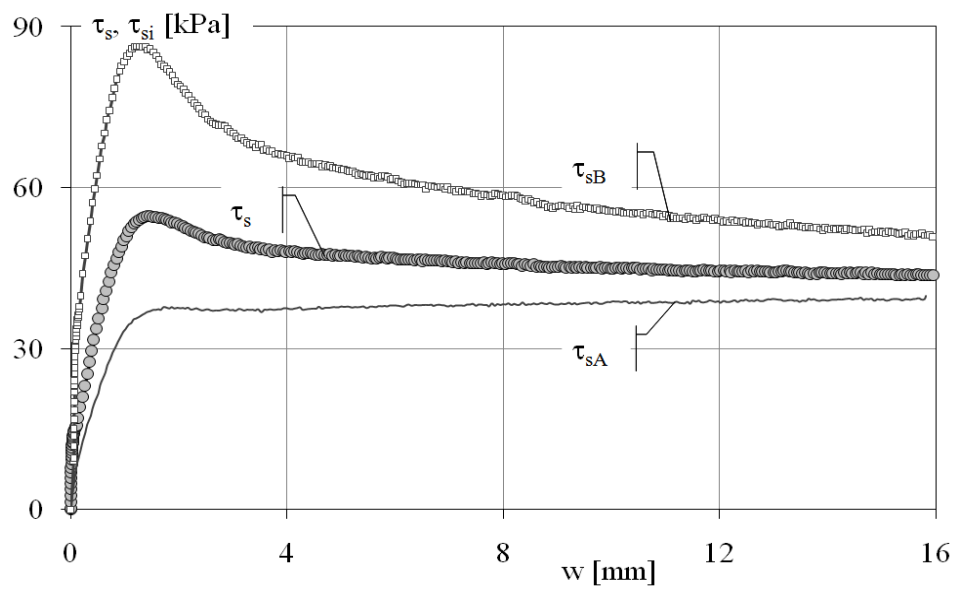
| SPC_16_MD_80       |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |                                     | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|-------------------------------------|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |                                     | 7.7   | 105                  | 48                   | -20                |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |                                     | 20.3  | 295                  | 134                  | 27                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |                                     |       |                      |                      |                    |
| 80                 | 89                 | 16             | 320            | 57              | 0.093           | 1.3            |   |                                     |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |       |                      |                      |                    |



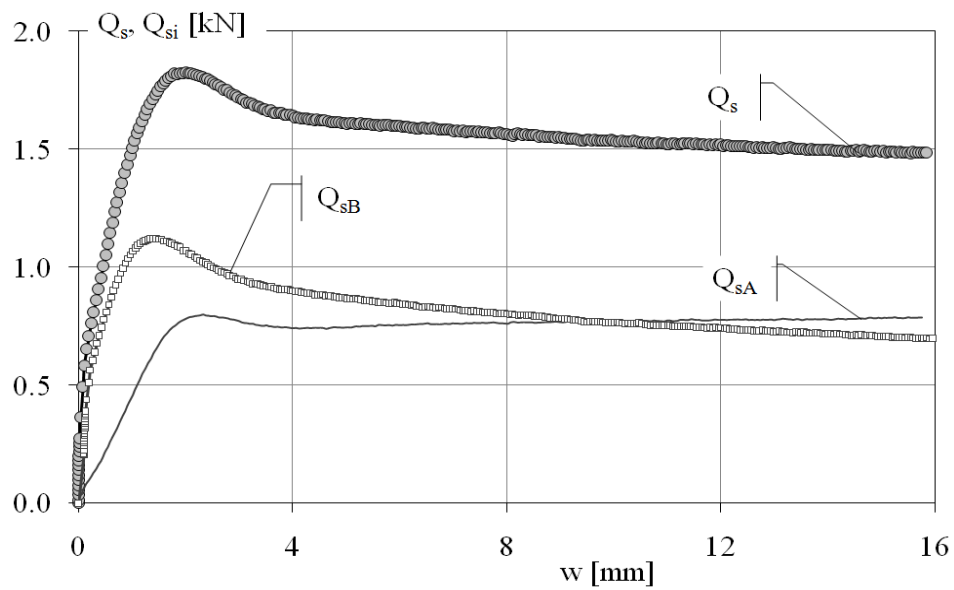
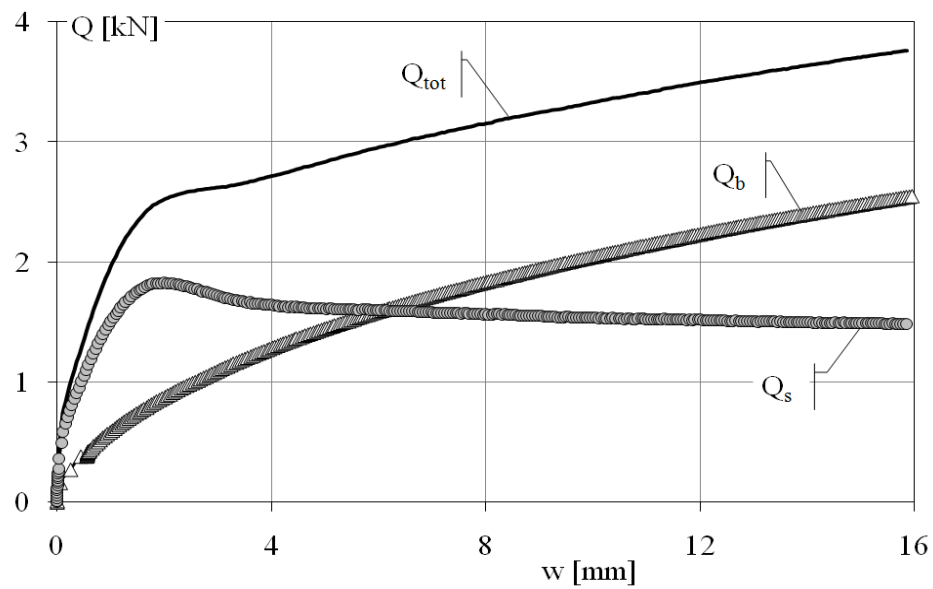
| SPC_16_HD_30                        |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |  | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|-------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|--|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato                  |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 3.0   | 44                   | 20                   | -8                 |
| a/g                                 | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |  | 7.7   | 119                  | 54                   | 9                  |
| [-]                                 | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |  |       |                      |                      |                    |
| 30                                  | 34                 | 16             | 320            | 80              | 0.093           | 1.3            |   |  |       |                      |                      |                    |
| $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                    |                |                |                 |                 |                |   |  |       |                      |                      |                    |



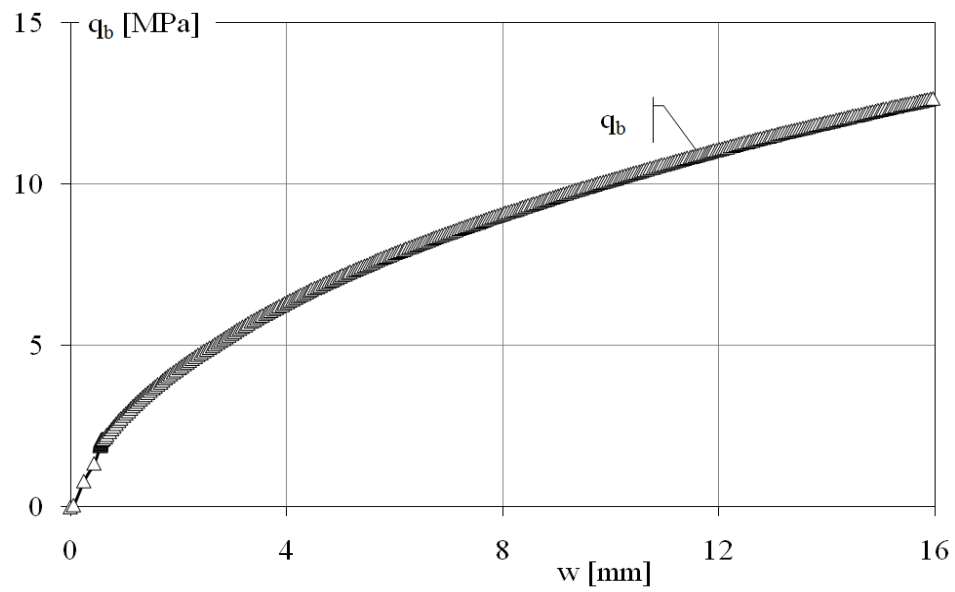
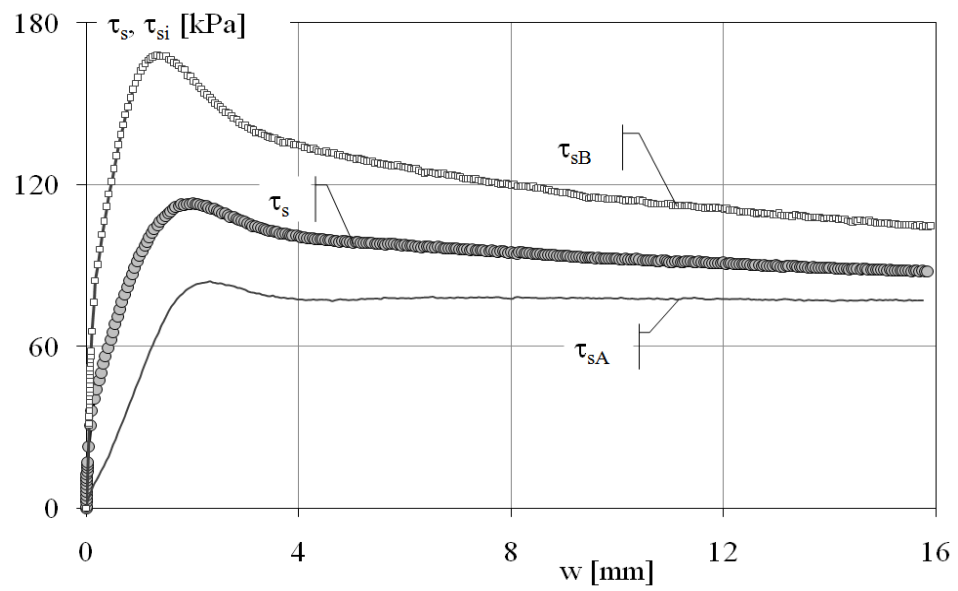
| SPC_16_HD_30                        |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |  | z [m] | $\sigma'_{v0}$<br>[kPa] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{res}$<br>[kPa] |
|-------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|--|-------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| idealm. trivellato                  |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 3.0   | 44                      | 20                      | -8                    |
| a/g                                 | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |  | 7.7   | 119                     | 54                      | 9                     |
| [-]                                 | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |  |       |                         |                         |                       |
| 30                                  | 34                 | 16             | 320            | 80              | 0.093           | 1.3            |   |  |       |                         |                         |                       |
| $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                    |                |                |                 |                 |                |   |  |       |                         |                         |                       |




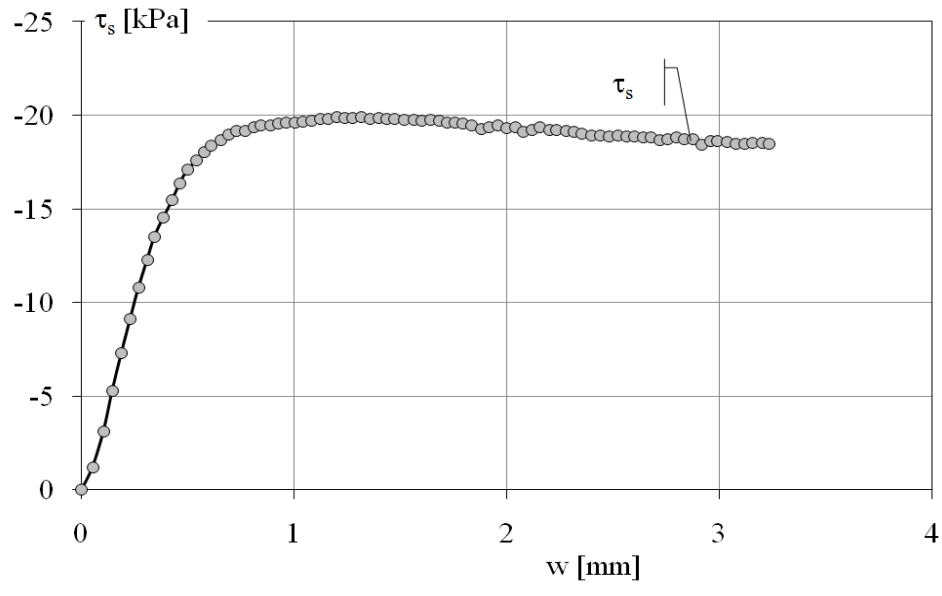
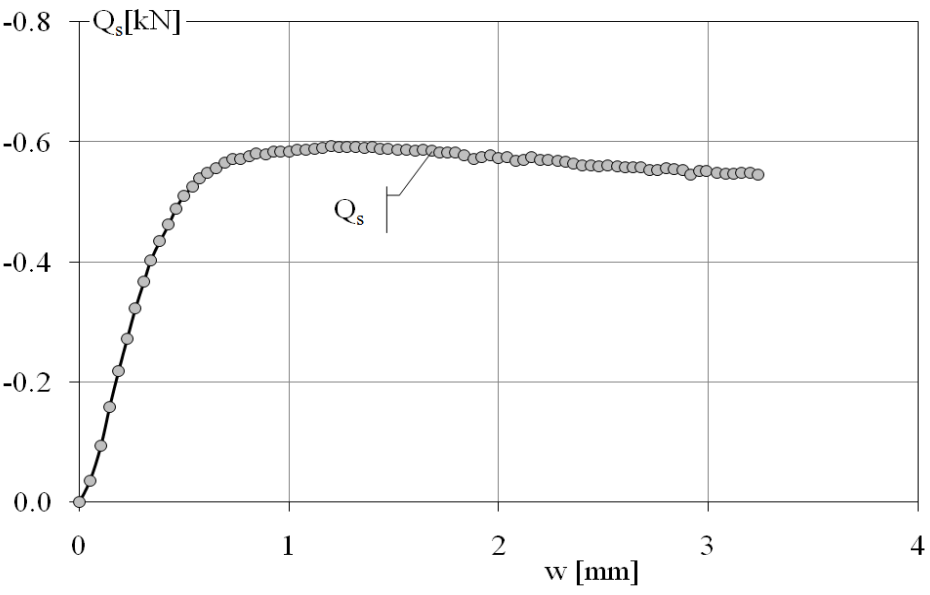
| SPC_16_HD_80                        |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |  | z [m] | $\sigma'_{v0}$<br>[kPa] | $\sigma'_{n0}$<br>[kPa] | $\tau_{res}$<br>[kPa] |
|-------------------------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|--|-------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|
| idealm. trivellato                  |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |  | 8.0   | 116                     | 53                      | -30                   |
| a/g                                 | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |  | 21.6  | 336                     | 153                     | 31                    |
| [-]                                 | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |  |       |                         |                         |                       |
| 80                                  | 90                 | 16             | 320            | 83              | 0.093           | 1.3            |   |  |       |                         |                         |                       |
| $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                    |                |                |                 |                 |                |   |  |       |                         |                         |                       |



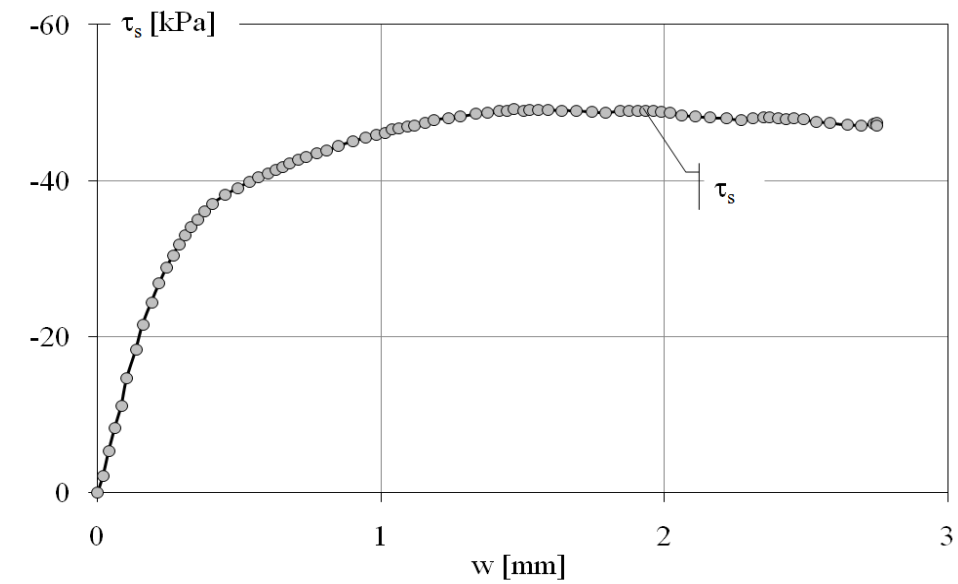
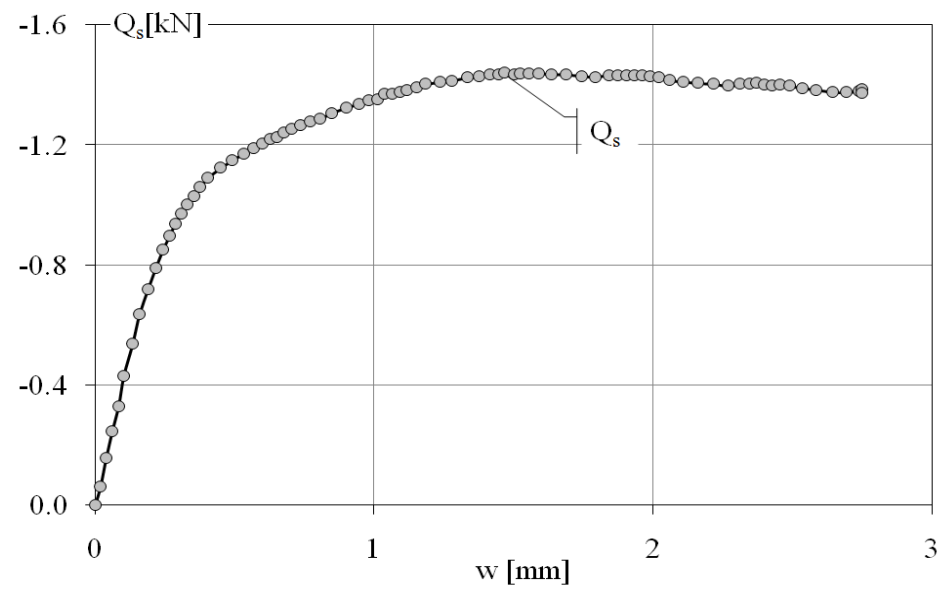
| SPC_16_HD_80       |                    |                |                | Compressione    |                 |                |   |                                     | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|-------------------------------------|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | A |                                     | 8.0   | 116                  | 53                   | -30                |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> | B |                                     | 21.6  | 336                  | 153                  | 31                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |                                     |       |                      |                      |                    |
| 80                 | 90                 | 16             | 320            | 83              | 0.093           | 1.3            |   |                                     |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |       |                      |                      |                    |



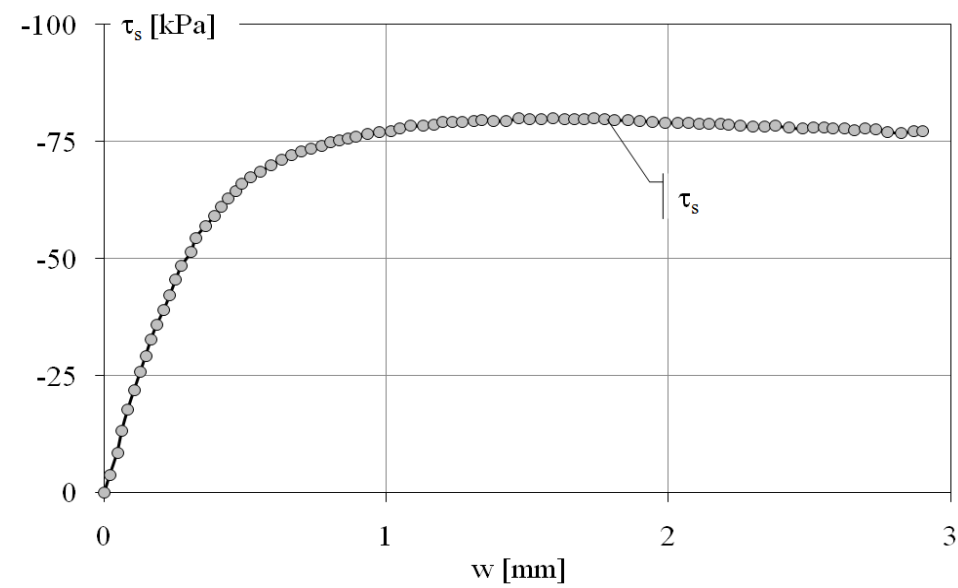
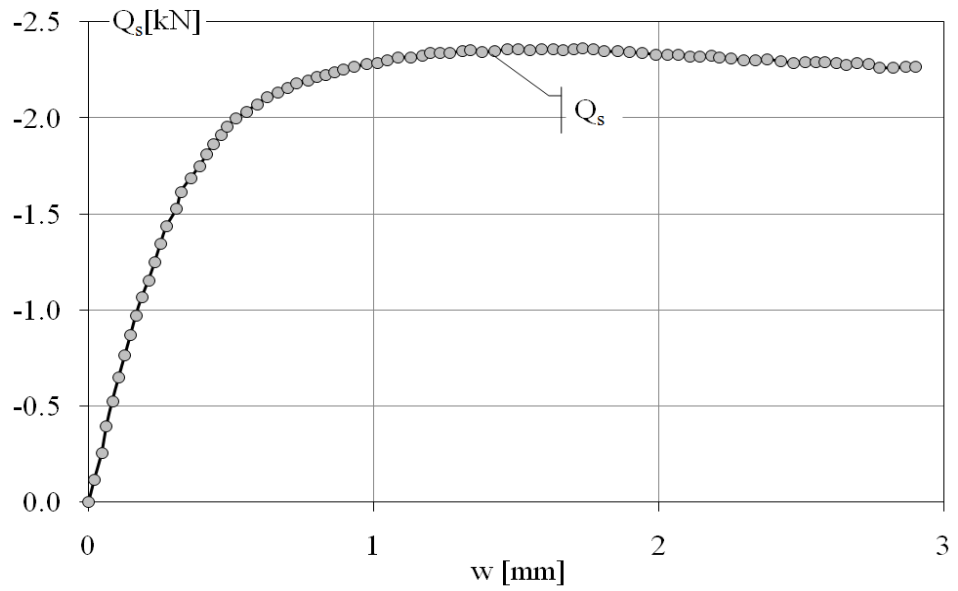
| Pull 1             |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   | z [m]                            | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|----------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                |  | 4.8                              | 64                   | 29                   | 10                 |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |                                  |                      |                      |                    |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |                                  |                      |                      |                    |
| 30                 | 33                 | 32             | 320            | 44              | 0.093           | 0.86           |   |                                  |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   | k <sub>0</sub> = 1-senφ'cv=0.455 |                      |                      |                    |




| Pull 2             |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | →   | 12.5  | 169                  | 77                   | 27                 |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |       |                      |                      |                    |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |       |                      |                      |                    |
| 80                 | 88                 | 32             | 320            | 46              | 0.093           | 0.86           |   |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                | k <sub>0</sub> = 1-senφ' <sub>cv</sub> =0.455 |       |                      |                      |                    |

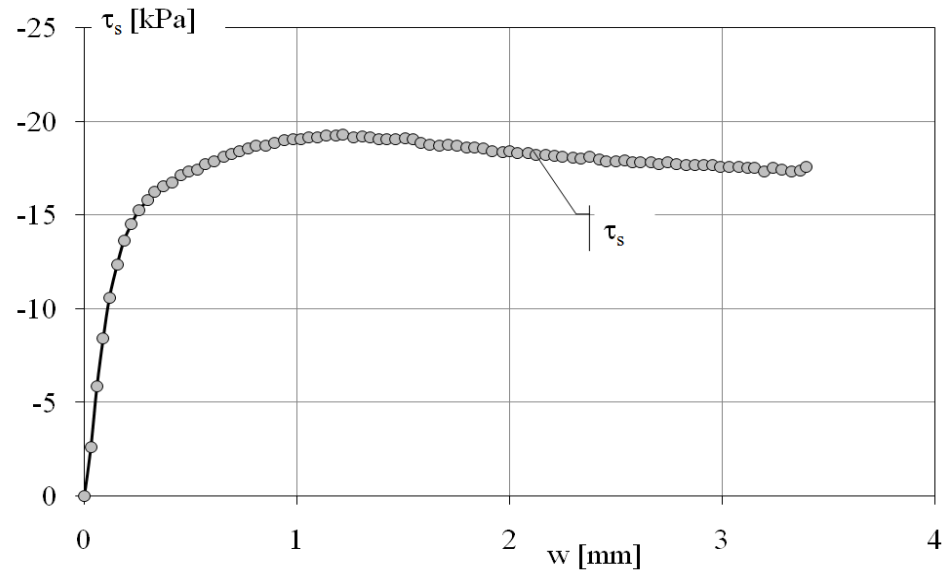
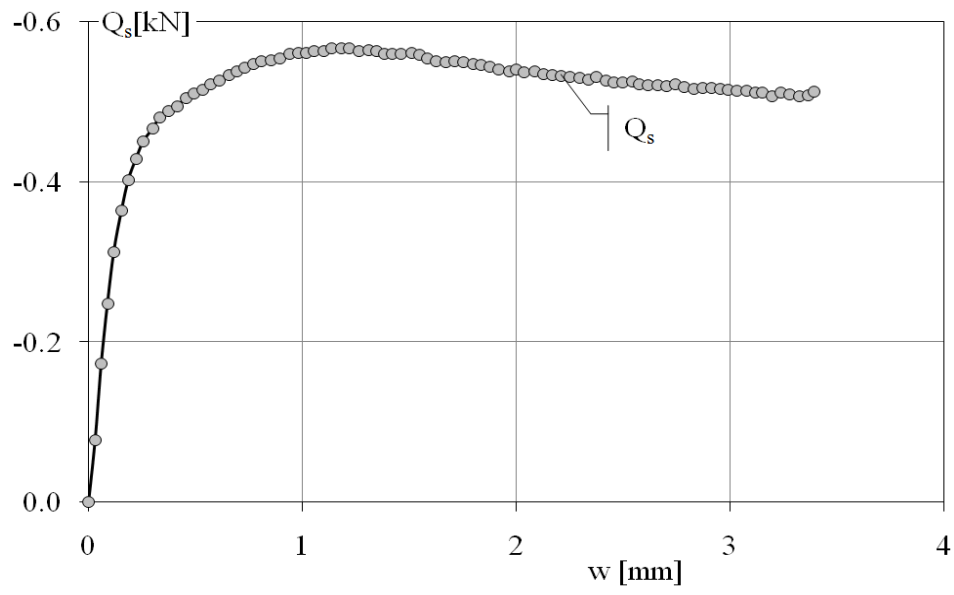



| Pull 3             |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   | z [m]                               | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|-------------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | → | 20.5                                | 281                  | 128                  | 44                 |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |                                     |                      |                      |                    |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |                                     |                      |                      |                    |
| 130                | 142                | 32             | 320            | 50              | 0.093           | 0.86           |   |                                     |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                |   | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |                      |                      |                    |

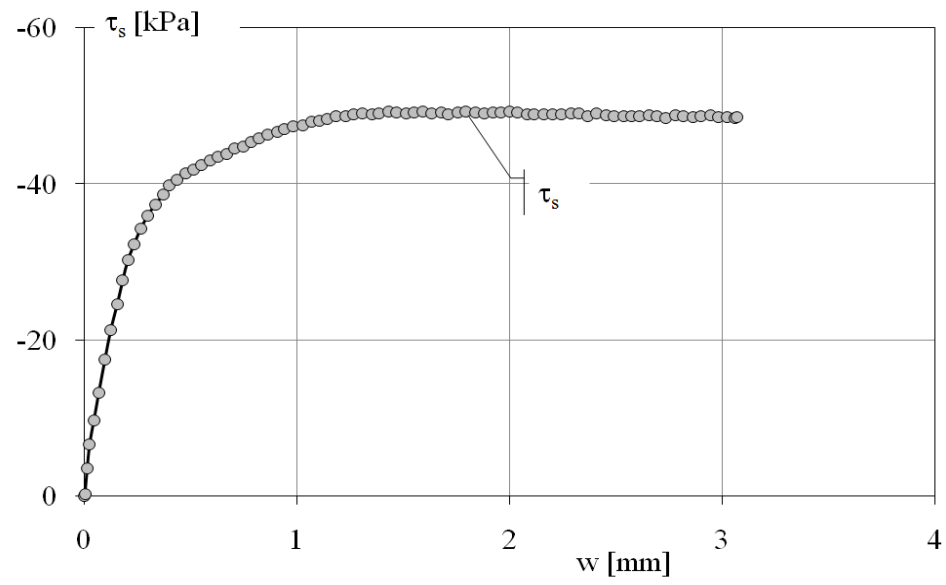
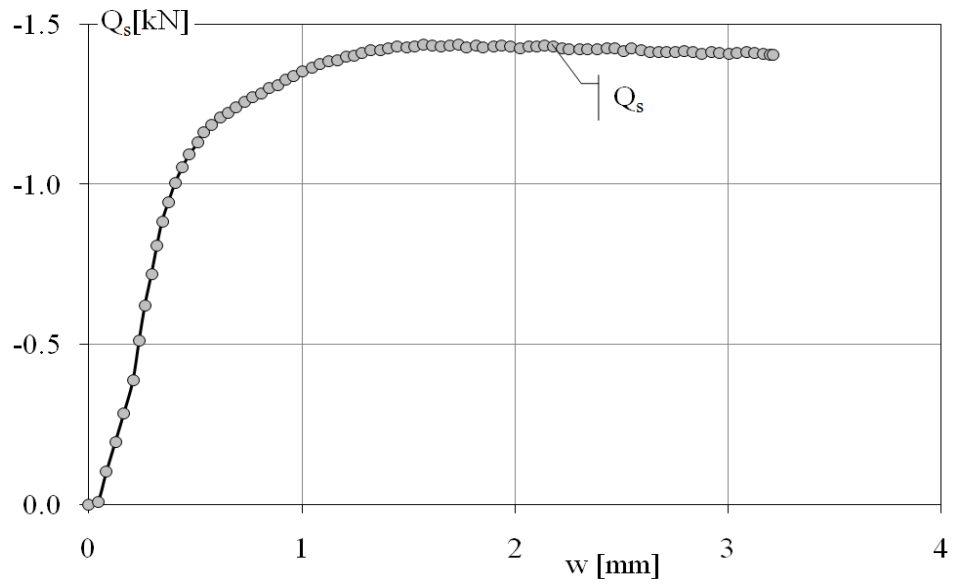




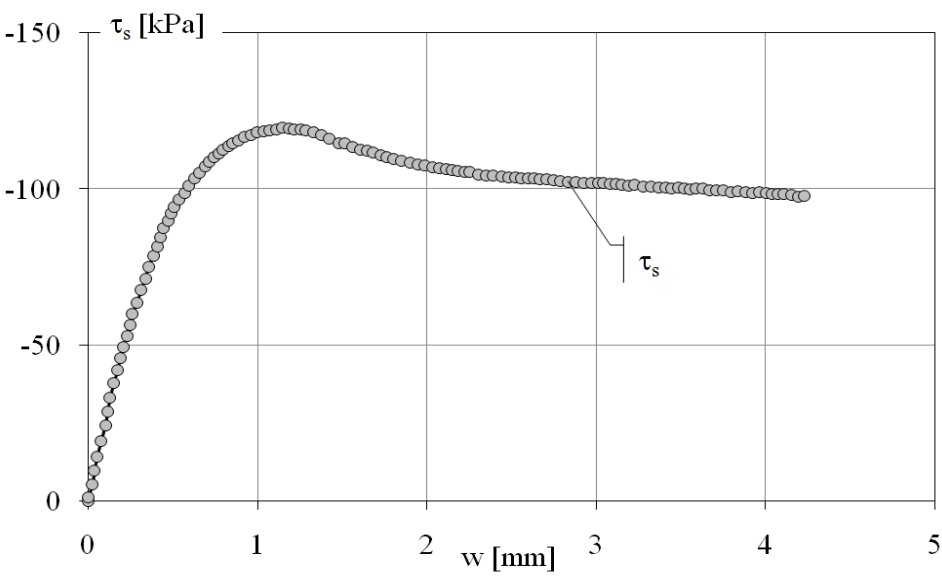
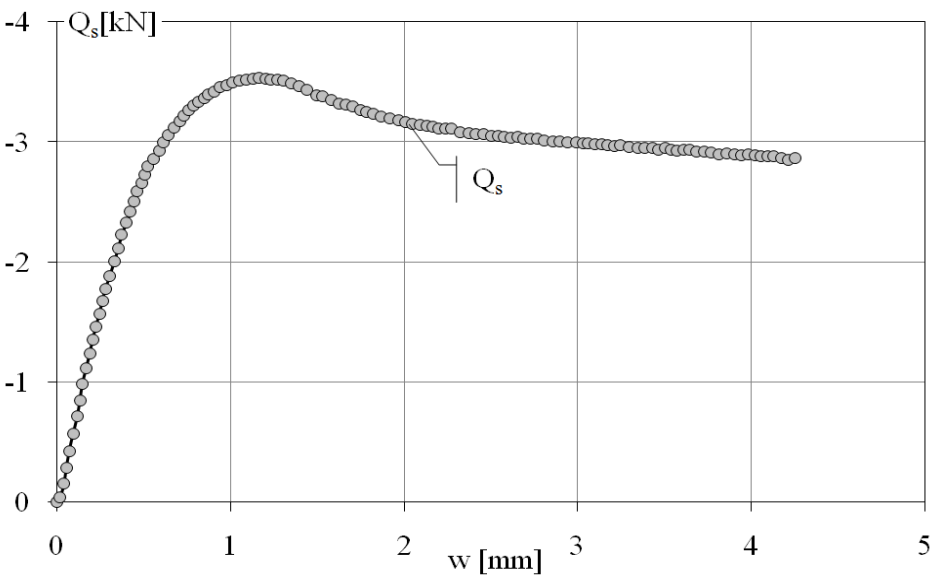
| Pull 8             |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                |  |       |                      |                      |                    |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |       |                      |                      |                    |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   | 4.7   | 64                   | 29                   | 10                 |
| 30                 | 33                 | 32             | 320            | 46              | 0.093           | 0.86           |   |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$   |       |                      |                      |                    |




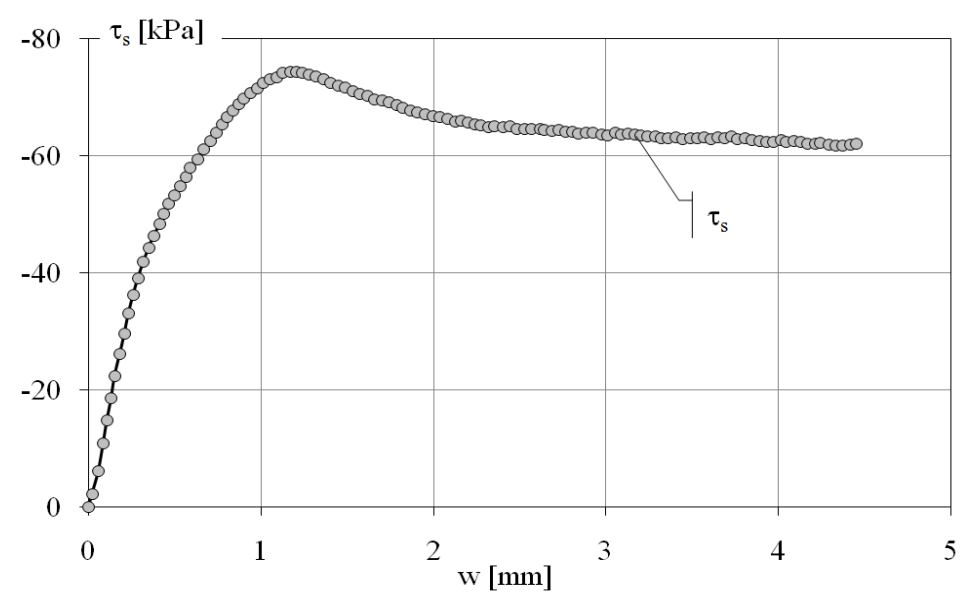
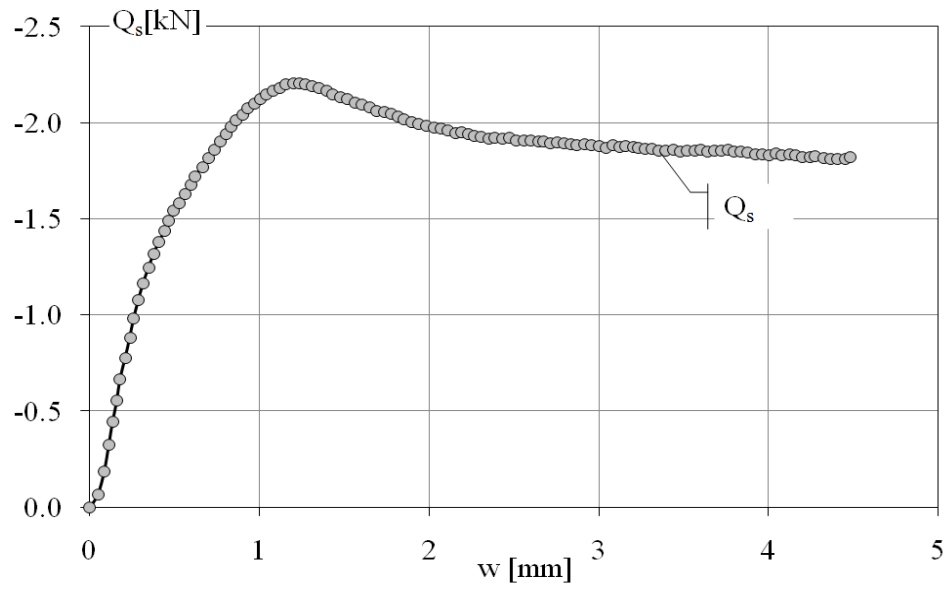
| Pull 9             |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                |  |       |                      |                      |                    |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   | 12.5  | 171                  | 78                   | 28                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |       |                      |                      |                    |
| 80                 | 88                 | 32             | 320            | 51              | 0.093           | 0.86           |   |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$   |       |                      |                      |                    |



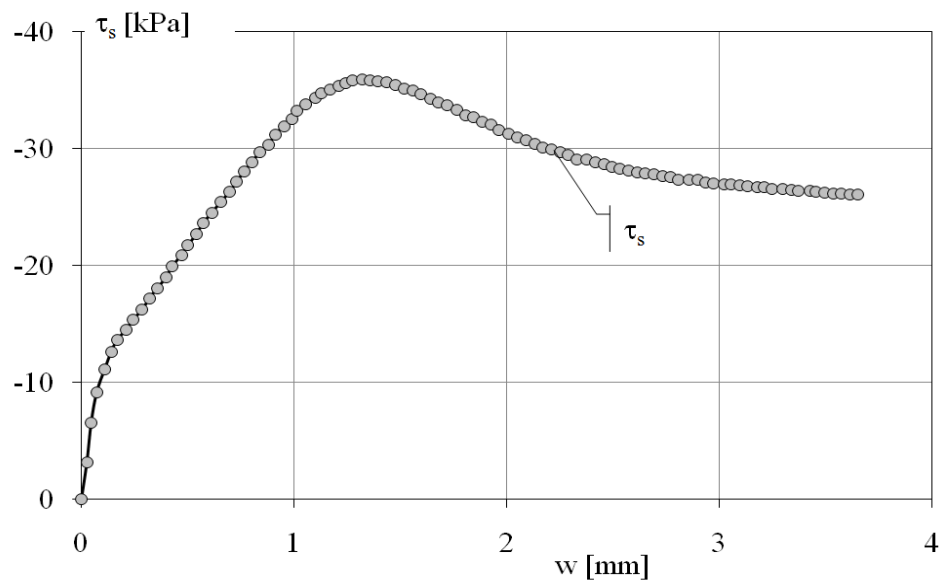
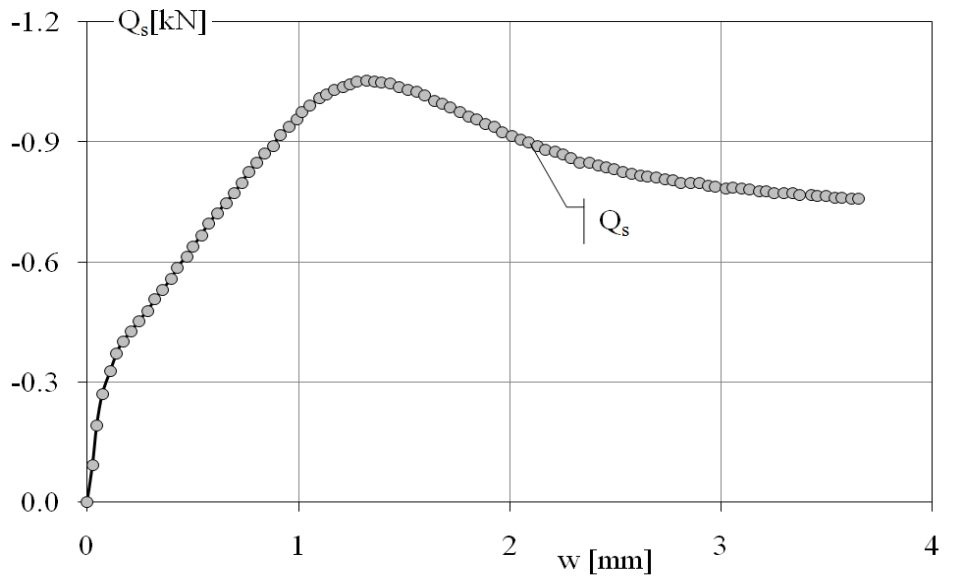
| Pull 4             |                    |                |                | Trazione        |                 |                |                                     | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------------------------|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                | →                                   | 20.5  | 303                  | 138                  | 44                 |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |                                     |       |                      |                      |                    |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |                                     |       |                      |                      |                    |
| 130                | 142                | 32             | 320            | 81              | 0.093           | 0.86           |                                     |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |       |                      |                      |                    |




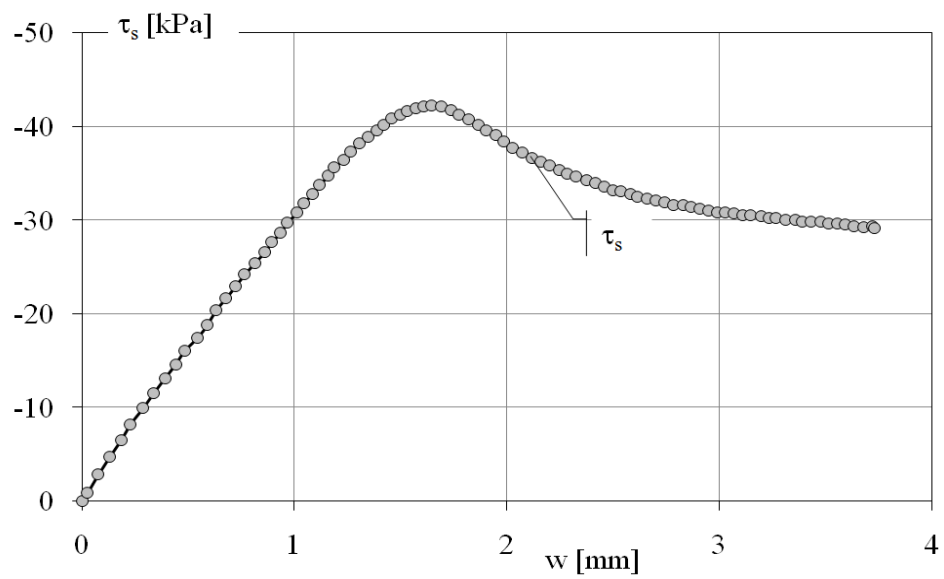
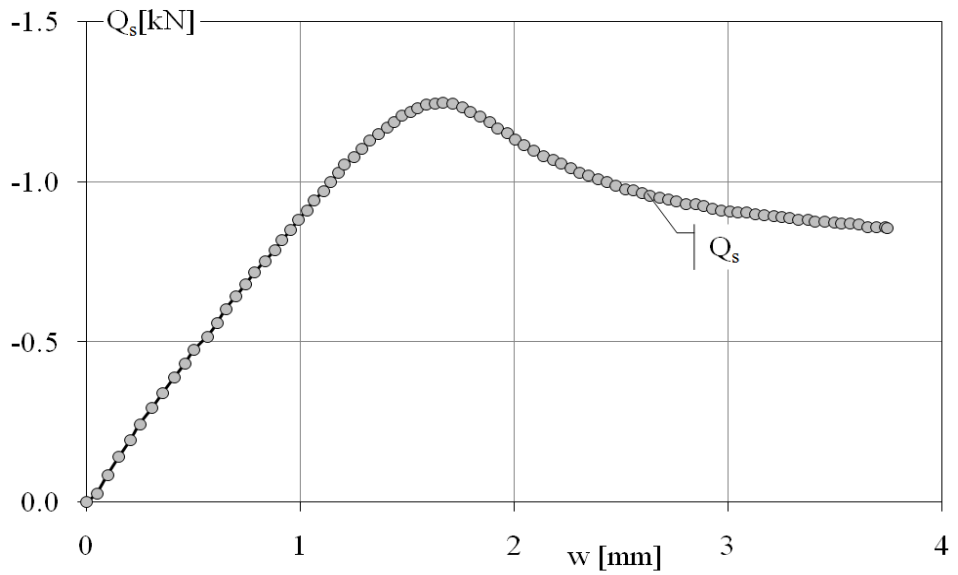
| Pull 5             |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                |  | 12.7  | 189                  | 86                   | 27                 |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |       |                      |                      |                    |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |       |                      |                      |                    |
| 80                 | 88                 | 32             | 320            | 84              | 0.093           | 0.86           |   |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$   |       |                      |                      |                    |




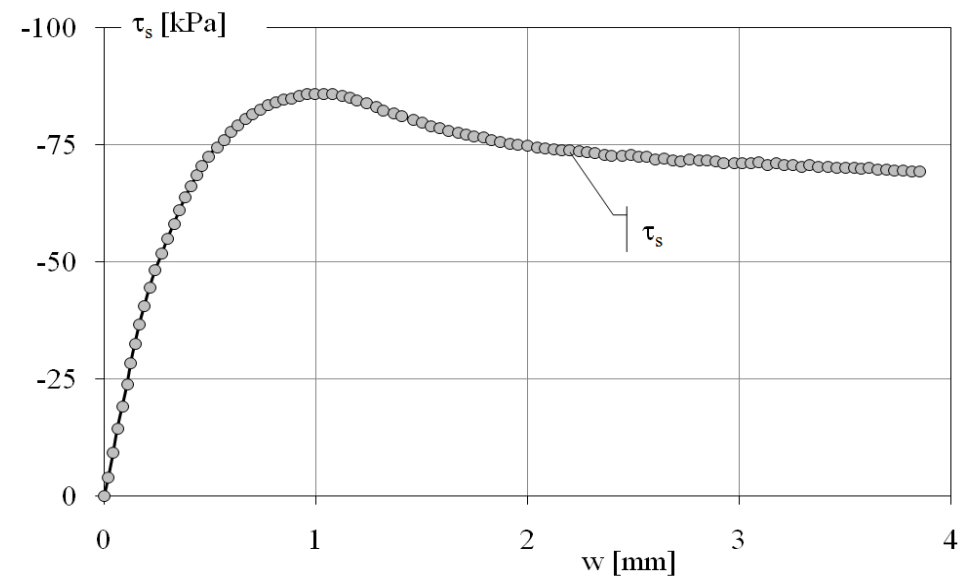
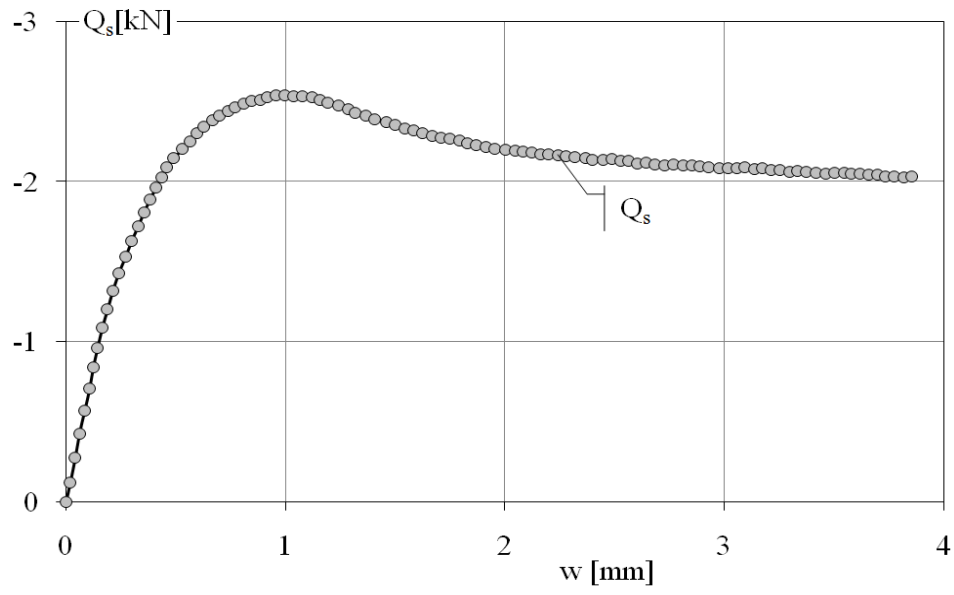
| Pull 6             |                    |                |                | Trazione        |                 |                |                                     | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|-------------------------------------|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                |                                     |       |                      |                      |                    |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |                                     |       |                      |                      |                    |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |                                     | 4.7   | 70                   | 32                   | 10                 |
| 30                 | 33                 | 32             | 320            | 84              | 0.093           | 0.86           |                                     |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$ |       |                      |                      |                    |




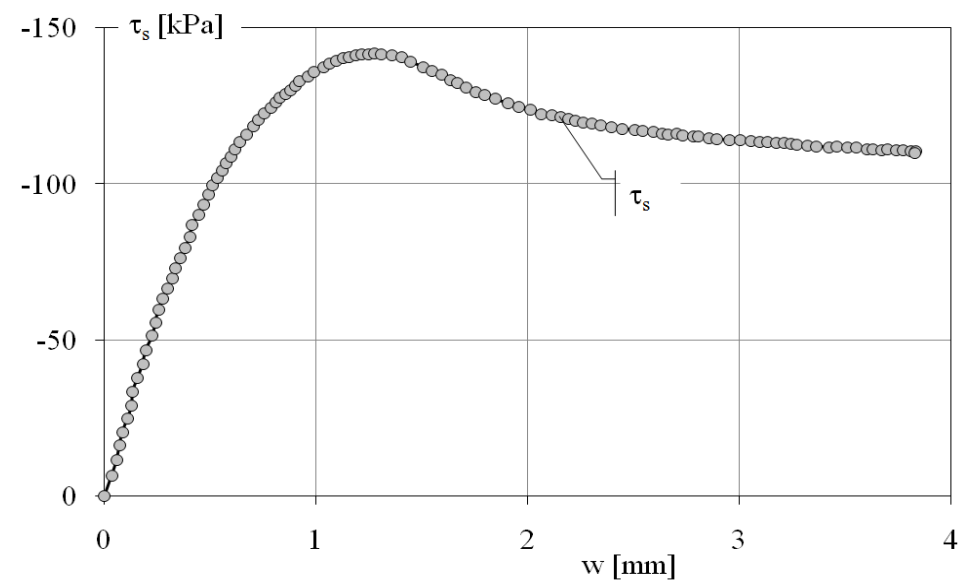
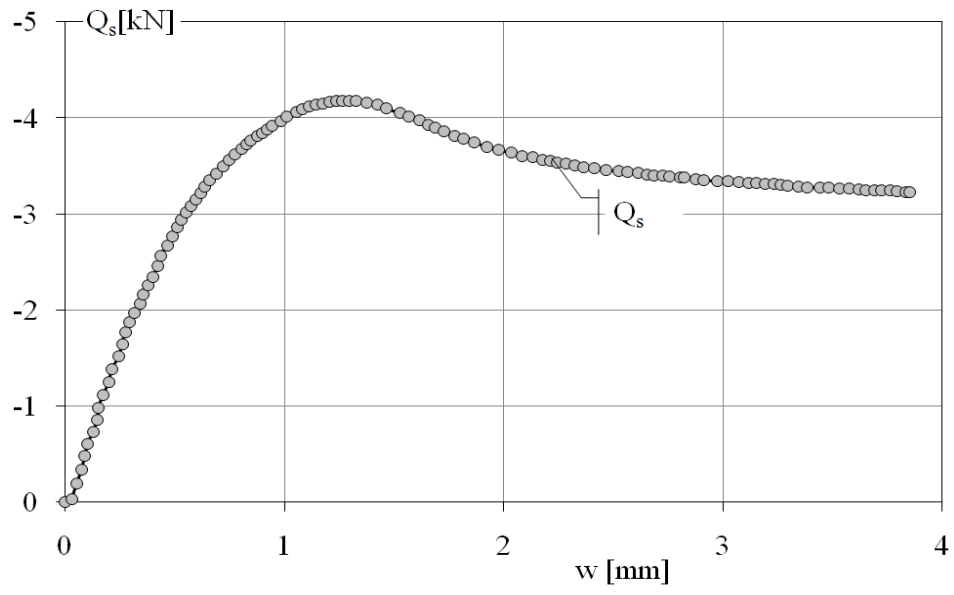
| Pull 7             |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                |  |       |                      |                      |                    |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   | 4.7   | 70                   | 32                   | 10                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |       |                      |                      |                    |
| 30                 | 33                 | 32             | 320            | 85              | 0.093           | 0.86           |   |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$   |       |                      |                      |                    |




| Pull 10            |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                |  |       |                      |                      |                    |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   | 12.6  | 189                  | 86                   | 27                 |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |       |                      |                      |                    |
| 80                 | 88                 | 32             | 320            | 84              | 0.093           | 0.86           |   |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                | $k_0 = 1 - \sin \phi'_{cv} = 0.455$   |       |                      |                      |                    |



| Pull 11            |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                |  | 20.4  | 305                  | 139                  | 44                 |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |       |                      |                      |                    |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |       |                      |                      |                    |
| 130                | 143                | 32             | 320            | 85              | 0.093           | 0.86           |   |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                | k <sub>0</sub> = 1-senφ'cv=0.455  |       |                      |                      |                    |





| Pull 12            |                    |                |                | Trazione        |                 |                |   | z [m] | $\sigma'_{v0}$ [kPa] | $\sigma'_{n0}$ [kPa] | $\tau_{res}$ [kPa] |
|--------------------|--------------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|---|-------|----------------------|----------------------|--------------------|
| idealm. trivellato |                    |                | strum.         | Sabbia FF secca |                 |                |  | 4.8   | 70                   | 32                   | 10                 |
| a/g                | a/g <sub>L/2</sub> | d <sub>m</sub> | L <sub>m</sub> | D <sub>R</sub>  | D <sub>50</sub> | R <sub>n</sub> |   |       |                      |                      |                    |
| [-]                | [-]                | [mm]           | [mm]           | [%]             | [mm]            | [-]            |   |       |                      |                      |                    |
| 30                 | 33                 | 32             | 320            | 85              | 0.093           | 0.86           |   |       |                      |                      |                    |
|                    |                    |                |                |                 |                 |                | k <sub>0</sub> = 1-senφ'cv=0.455  |       |                      |                      |                    |

